

SPATIALISATION DE LA PLUIE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'AGNEBY À AGBOVILLE, CÔTE D'IVOIRE

Akissi Bienve Pélagie KOUAKOU^{1,2*}, Attoungbré Jean-Philippe DEGUY², Zomi Claude LAGOBO¹, Agnidé Emmanuel LAWIN³, Bamory KAMAGATE² et Boko AKA¹

¹*Université NANGUI ABROGOUA, Institut de Recherche sur les Energies Nouvelles (IREN), 02 BP 801 Abidjan 01, Côte d'Ivoire*

²*Université NANGUI ABROGOUA, Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE), 02 BP 801 Abidjan 01, Côte d'Ivoire*

³*Université d'Abomey-Calavi, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

(reçu le 25 Avril 2022; accepté le 18 Juin 2022)

* Correspondance, e-mail : akissibienve@gmail.com

RÉSUMÉ

Le bassin versant de l'Agneby à Agboville, localisé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire avec une superficie de 4693 km² est drainé par la Rivière Agneby. L'objectif de l'étude est d'analyser la spatialisation de la pluie à l'échelle du bassin. 14 stations pluviométriques ont été utilisées sur la période de 1950 à 2013. Les méthodes utilisées sont l'indice pluviométrique, la moyenne mobile pondérée, les tests statistiques de détection de rupture (Test de Pettitt, Méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la Segmentation d'Hubert) ont été effectués par le logiciel Krhonostat 1.01 et enfin le logiciel ArcGIS 10 a permis de réaliser les cartes de la spatialisation pluviométrique. Les résultats ont montré que les indices pluviométriques calculés associés à l'élimination saisonnière au moyen du Filtre de Hanning indiquent deux grandes sous-périodes sur la période 1950 - 2013. La période excédentaire (1950 - 1968) présente respectivement 19 % et 20 % d'années excédentaires à la station d'Agboville et pour le bassin tandis qu'à la station de Bongouanou, il y a 14 % d'années excédentaires et 13 % déficitaires pendant la période excédentaire. Par contre la période déficitaire (1969 - 2013), les proportions des années déficitaires sont plus élevées (environ 60 %) que celles des années excédentaires (8 %) après les ruptures de 1966 à Bongouanou et 1968 pour Agboville. Les déficits pluviométriques des périodes après rupture par rapport aux périodes avant rupture sont de 20 % à Agboville, 19 % pour le bassin. L'examen des isohyètes révèle une inégalité dans la distribution spatiale de la pluviométrie dans le

bassin avec des hauteurs moyennes de pluie oscillant entre 1150 mm et 1530 mm au Sud-Est avant la rupture. Après la rupture, il y a un recourbement des isohyètes autour des stations. La baisse de l'amplitude du signal pluviométrique est notée dans les régions d'Akoupé à l'Est (1032 mm) et le centre du bassin et la zone de Bongouanou (1058 mm) au Nord-Ouest.

Mots-clés : *Bassin versant, Agneby à Agboville, pluviométrie, test de rupture, déficit, spatialisation.*

ABSTRACT

Spatialization of rainfall in the Agneby watershed in Agboville, Côte d'Ivoire

The watershed of the Agneby in Agboville has an area of approximately 4693 km² and drained by the Agneby River is located in the south-east of Côte d'Ivoire. The objective of the study is to analyze the spatialization of rain at the scale of the basin. For this, 14 rainfall stations were used over the period from 1950 to 2013. The methods used are the rainfall index, the weighted moving average, the statistical tests for detection of rupture (Test of Pettitt, Bayesian method of Lee and Heghinian and the Segmentation of Hubert) detected by the software Krhonostat 1.01 and finally the software ArcGIS 10 made it possible to produce maps of rainfall spatialization. The results showed that the calculated rainfall indices associated with seasonal elimination using the Hanning Filter indicate two major sub-periods over the period 1950 - 2013. The surplus period (1950 - 1968) shows respectively 19 % and 20 % of surplus years at the Agboville station and for the basin, while at the Bongouanou station, there are 14 % of surplus years and 13 % losses during the surplus period. On the other hand, the deficit period (1969 - 2013), the proportions of deficit years are higher (about 60 %) than those of surplus years (8 %) after the ruptures of 1966 in Bongouanou and 1968 for Agboville. The rainfall deficits of the periods after rupture compared to the periods before rupture are 20 % in Agboville, 19 % for the basin. The examination of the isohyets reveals an inequality in the spatial distribution of rainfall in the basin with average rainfall heights oscillating between 1150 mm and 1530 mm in the South-East before the rupture. After the rupture, there is a bending of the isohyets around the stations. The decrease in the amplitude of the rainfall signal is noted in the regions of Akoupé in the east (1032 mm) and the center of the basin and the Bongouanou area (1058 mm) in the North-West.

Keywords : *Watershed, rainfall, break test, deficit, spatialization, Agneby to Agboville.*

I - INTRODUCTION

Le régime pluviométrique a subi de grandes modifications en Afrique de l'Ouest depuis plusieurs années [1, 2]. Cette modification de pluie peut se manifester par de longues périodes de sécheresse avec pour conséquences des effets négatifs sur le cycle hydrologique et les activités socio-économiques [3]. La surexploitation des ressources en eau peut provoquer une régression de la pluviométrie. Par ailleurs, pour caractériser les ressources en eau, il est nécessaire d'aborder les facteurs qui interviennent dans le fonctionnement hydrologique à l'échelle des bassins versants. La Côte d'Ivoire présente une vulnérabilité au changement du climat depuis la décennie 1970, en raison des défis politiques, socio-économique et démographique auxquels elle fait face. À cela, s'ajoute la dégradation du couvert végétal qui agit sur le régime hydrologique. L'accès à la ressource en eau est devenu préoccupant. Dans ce contexte, il est important d'étudier la variabilité de la pluie à l'échelle locale et l'échelle spatiale. En revanche peu d'études, surtout récentes sont disponibles sur la spatialisation de la pluie à l'échelle de petits bassins tels que celui de l'Agneby. C'est pourquoi, l'étude vise à analyser la spatialisation de la pluie sur le bassin versant de l'Agneby à Agboville en vue de déterminer les zones de fortes et de faibles pluviométries. De façons spécifiques il s'agit de caractériser la variabilité interannuelle des pluies et enfin de présenter la distribution spatiale des pluies. Pour ce faire, les données annuelles de la pluviométrie ont été collectées des stations.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Présentation de la zone d'étude

Le sous bassin versant de l'Agneby à Agboville situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire est drainé par la Rivière Agneby. Celle-ci s'écoule du Nord vers le Sud et se déverse dans la lagune Ebrié au niveau de la ville de Dabou. L'Agneby prend sa source dans les environs du village d'Afféré, département de Bongouanou avec une altitude de 250 m (*Figure 1*). Sa superficie est d'environ 4 693 km² avec un périmètre de 328 km. Il s'étend sur une longueur d'environ 120 km et une largeur de 80 mètres. Dans son cours inférieur, l'Agneby coule dans les marais en direction du Sud côtier [4, 5]. La forme de la zone d'étude est losange avec un coefficient de compacité (KC) de 1,34. La valeur de cet indice signifie que les eaux de ruissellement mettent plus de temps pour atteindre l'exutoire du bassin. Aussi, le profil en long est assez régulier et la pente moyenne est de 1,25 m/km [5].

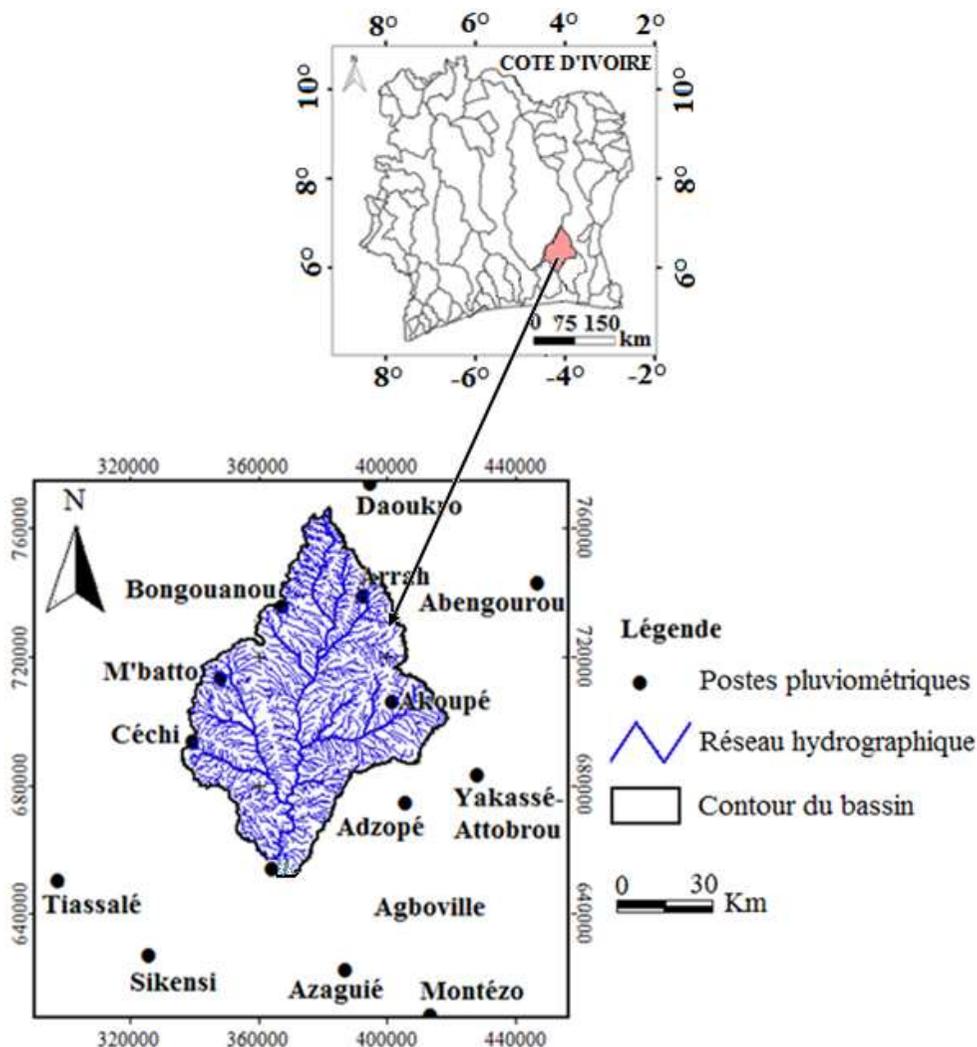


Figure 1 : Localisation de la zone étudiée et répartition spatiale des postes pluviométriques du bassin versant de l'Agneby à Agboville

II-2. Collecte des données

Les 14 stations pluviométriques (*Figure 1*) pour l'étude et la longueur des séries chronologiques respectives sont indiquées dans le *Tableau 1*. Du point de vue de la représentativité des données, le choix de certaines stations pluviométriques situées hors de l'aire d'alimentation de la zone d'étude mais situées à proximité du bassin versant a été nécessaire. Par ailleurs, du fait de la longueur des séries de données pluviométriques aux stations d'Agboville et de Bongouanou, celles-ci sont utilisées dans la suite de l'étude pour les analyses à l'échelle ponctuelle. A l'échelle du bassin versant de l'Agneby à Agboville,

c'est l'ensemble du réseau de 14 stations pluviométriques qui est utilisé pour déterminer la pluie moyenne du bassin et a servi au calcul des indices et aux différents tests de rupture à cette échelle. Les paramètres du variogramme modélisé pour obtenir cette pluie moyenne par la méthode de krigeage sont l'effet de pépite $NE = 0,2$; le seuil $S = 0,9$ et la portée $R = 15$ km [4].

Tableau 1 : Caractéristiques des séries pluviométriques du bassin versant de l'Agneby à Agboville

Stations	Période d'observation	Période d'étude (1950 - 2013)	Durée de la période d'étude (ans)	Nombre d'années manquantes (1950 - 2013)
Séries pluviométriques				
Bongouanou	1947 - 2012	1950 - 2012	63	7 (11 %)
Arrah	1976 - 2013	1976 - 2013	38	17 (45 %)
M'batto	1976 - 2013	1976 - 2013	38	9 (24 %)
Akoupé	1979 - 2010	1979 - 2010	32	7 (22 %)
Céchi	1950 - 1999	1950 - 1999	50	5 (10 %)
Adzopé	1944 - 2010	1950 - 2010	61	0 (0 %)
Agboville	1923 - 2013	1950 - 2013	64	4 (6 %)
Daoukro	1955 - 2013	1955 - 2013	59	14 (24 %)
Azaguié	1933 - 1994	1950 - 1994	45	0 (0 %)
Sikensi	1976 - 2007	1976 - 2007	32	0 (0 %)
Yakassé - Attobrou	1976 - 2013	1976 - 2013	38	0 (0 %)
Tiassalé	1922 - 2010	1950 - 2010	61	13 (21 %)
Abengourou	1919 - 2000	1950 - 2000	51	2 (4 %)
Montézo	1979 - 2010	1979 - 2010	32	0 (0 %)

Les caractéristiques statistiques descriptives des données pluviométriques annuelles (mm) de 1950 à 2013 des 14 postes et hydrométriques sont consignées dans le **Tableau 2**. Les pluies moyennes annuelles dans le bassin versant de l'Agneby à Agboville et les environs du bassin varient entre 1032,3 mm (Akoupé, sur la période 1979 - 2013) et 1501,9 mm (Azaguié, sur la période 1950 - 2013) avec une moyenne générale de 1230,4 mm. Les coefficients de variation (Cv) des pluies moyennes annuelles fluctuent entre 0,17 et 0,27. Cela signifie que la dispersion des données des séries pluviométriques considérées est assez faible. Ces valeurs montrent que les données pluviométriques retenues pour l'étude sont assez homogènes et représentatives de la zone d'étude.

Tableau 2 : *Caractéristiques statistiques des données pluviométriques du bassin versant (1950 - 2013)*

Stations	Minimale	Maximale	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
Bongouanou	728,8	1737,1	1118,7	237,30	0,21
Arrah	824,9	1656,0	1128,3	191,81	0,17
M'batto	800,5	1745,4	1110,6	190,72	0,17
Akoupé	100,2	1412,4	1032,3	245,68	0,24
Céchi	461,8	1848,3	1144,9	258,76	0,23
Adzopé	706,9	2186,4	1344,8	287,01	0,21
Agboville	855,8	2001,2	1286,5	274,65	0,21
Daoukro	520,2	1839,4	1146,8	245,69	0,21
Azaguié	355,3	2454,9	1501,9	405,56	0,27
Sikensi	711,3	1851,5	1255,6	281,29	0,22
Yakassé - Attobrou	853,3	1666,9	1218,2	218,51	0,18
Tiassalé	746,7	1816,9	1254,7	271,67	0,22
Abengourou	893,1	1976,7	1270,3	229,41	0,18
Montézo	776,7	2075,2	1412,7	344,13	0,24

Le dépouillement des séries chronologiques issues des 14 stations pluviométriques a permis de constater des lacunes pendant quelques mois d'une année ou plusieurs années de la période d'étude. Ces lacunes peuvent être dues à des erreurs de manipulation, d'oubli de transcription et aux défaillances des appareils de mesures. Les données pluviométriques entachées de lacunes sont corrigées pour leur meilleure utilisation. Ces données mensuels et annuels ont été comblées par la méthode de régression linéaire entre stations voisines (en amont ou en aval) ou encore avec des stations de bassins voisins [6, 7]. La caractérisation de la variabilité interannuelle et saisonnière de la pluie a été réalisée grâce à plusieurs logiciels dont Krhonostat 1.01, Excel™ 2010 et ArcGIS 10. Krhonostat 1.01 a permis de détecter les ruptures dans les séries pluviométriques. La cartographie des données pluviométriques a été réalisée grâce au logiciel ArcGIS 10. Aussi, certains traitements statistiques et les représentations graphiques ont été effectués grâce à Excel™ 2010.

II-3. Méthodes

II-3-1. Calcul des indices pluviométriques

Pour analyser la variabilité interannuelle et décennale des régimes pluviométriques ou hydrométriques, l'indice standardisé (I_i) défini par [8] a été utilisé. Il permet de déterminer les années/périodes excédentaires, normales ou moyennes et déficitaires dans une série chronologique et est calculé pour chaque année sur la période étudiée, selon l'Équation 1 :

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

avec, I_i : indice pluviométrique (ou hydrométrique) de Nicholson ;

X_i : valeur de la pluviométrie annuelle (ou du débit annuel) de l'année i ;

\bar{X} : valeur moyenne interannuelle de la pluviométrie (ou débit annuel) sur la période d'étude ;

σ : écart-type de la pluie annuelle (ou du débit annuel) sur la période d'étude.

Le **Tableau 3** indique la nature de l'année ou de la période choisie au regard de la valeur de l'indice. Le seuil $\pm 0,5$ choisi pour les années ou périodes moyennes reste subjectif mais ce seuil est souvent utilisé dans la littérature pour les régimes pluviométriques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest et il permet de bien discriminer les années/périodes déficitaires de celles excédentaires [4, 9, 10].

Tableau 3 : Nature de l'année/période en fonction de l'indice

Indice (I)	Année / Période
$I > 0,5$	Excédentaire
$I < - 0,5$	Déficitaire
$- 0,5 < I < 0,5$	normale

II-3-2. Moyenne mobile pondérée

La moyenne mobile pondérée permet d'éliminer par filtrage les variations saisonnières non physiques dans une série chronologique. Elle est effectuée à l'aide des équations recommandées par [11]. Le principe d'estimation de chaque terme est le suivant (**Équation 2**) :

$$Y(t) = 0,06x(t-2) + 0,25x(t-1) + 0,38x(t) + 0,25x(t+1) + 0,06x(t+2) \quad (2)$$

pour $3 \leq t \leq (n - 2)$

où, $Y(t)$ désigne le total pluviométrique pondéré du terme t ;

$x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t ;

$x_{(t+2)}$ et $x_{(t+1)}$ traduisent les totaux pluviométriques observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pondérés des deux premiers ($Y_{(1)}$, $Y_{(2)}$) et les deux derniers ($Y_{(n-1)}$, $Y_{(n)}$) termes de la série sont calculés au moyen des expressions 3, 4, 5 et 6 (n étant la taille de la série) :

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

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

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

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

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent d'écoulement, les moyennes mobiles sont centrées et réduites au moyen de *l'Équation 7* :

$$Y'_t = (Y_t - m) / \sigma \quad (7)$$

où, m est la moyenne de la série des moyennes pondérées et σ l'écart-type de la série des moyennes mobiles pondérées.

Cette méthode est efficace car elle permet de découper de façon perceptible les séries.

II-3-3. Tests statistiques de détection de rupture

II-3-3-1. Test de Pettitt

Le test non paramétrique de Pettitt [12], qui nécessite peu d'hypothèses, est efficace pour détecter les «ruptures» dans les séries pluviométriques et hydrométriques. Il dérive du test de Mann-Witney. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) pour $i=1$ à t et $t+1$ à N , appartiennent à la même population. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Le test de Pettitt repose sur le calcul de la variable $U_{t,N}$ définie par *l'Équation 8* :

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

avec, $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ sachant que $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$; $\text{sgn}(X) = 0$ si $X = 0$; $\text{sgn}(X) = -1$ si $X < 0$.

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$. Si k désigne la valeur de k_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par l'Équation 9 :

$$\text{Prob}(k_N > k) \approx 2 \exp\left(-\frac{6k^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (9)$$

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

II-3-3-2. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

Cette méthode ne s'exprime pas comme un test statistique classique. Son interprétation vise toutefois à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. Elle consiste à déclarer la série stationnaire ou non en analysant la densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture. Elle suppose a priori l'existence d'une rupture et calcule pour chaque année la probabilité qu'elle soit l'année de rupture [13]. On estime le point de rupture, soit par le mode de la distribution si celle-ci est unimodale, soit par le mode maximal pour une distribution multimodale. Les modes secondaires constituent des signaux non examinés. La méthode établit la distribution de probabilité a posteriori dans le temps d'un changement. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle suivant (Équation 10) :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (10)$$

où, les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 .

τ et δ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne.

Si p , la densité de probabilité a priori de τ est uniforme, a posteriori elle est définie par l'Équation 11 :

$$p(\tau/x) \propto [N/(\tau(N-\tau))]^{1/2} [R(\tau)]^{-(N-2)/2}, 0 \leq \tau \leq N-1 \quad (11)$$

$$\text{avec, } R(\tau) = \left[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^N (x_i - x_{N-\tau})^2 \right] / \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2 \text{ et}$$

$$\bar{x}_N = 1/N \sum_{i=1}^N x_i; \bar{x}_{\tau} = 1/\tau \sum_{i=1}^{\tau} x_i; \bar{x}_{N-\tau} = 1/(N-\tau) \sum_{i=\tau+1}^N x_i$$

II-3-3-3. Segmentation d'Hubert

[14] ont défini une procédure adaptée à la recherche, dans une série, de multiples changements de moyenne. A partir d'un algorithme spécifique, elle permet d'obtenir une ou plusieurs dates de ruptures qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes. Les paramètres suivants sont définis : i_k ($k = 1, 2, \dots, m$) le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment ; \bar{X}_k la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment, D_m l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérées. Cet écart dans ces conditions s'exprime par *l'Équation 12* :

$$D_m = \sum_{k=1}^m d_k \quad (12)$$

où, $d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2$ et d_k doit être minimum.

L'hypothèse de stationnarité de la série constitue l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse de stationnarité de la série est acceptée. La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique entre elle et la série est minimum. Cette contrainte est satisfaite par le test de Scheffé qui repose sur le concept de contraste et requiert un niveau de signification de 1 % ([15]).

II-3-4. Calcul des déficits pluviométriques

Ce calcul permet de déterminer le pourcentage de variation de la moyenne de la série de variables considérées d'une sous période T_i autour de la période T considérée [16]. Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode précise le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture. Ce déficit s'obtient par *l'Équation 13* :

$$D = \left(\frac{\overline{X}_j}{\overline{X}_i} - 1 \right) * 100 \quad (13)$$

avec, D le déficit observé pendant la sous période T_i ; \overline{X}_j la moyenne pluviométrique ou de débit de la sous-période après la rupture ; \overline{X}_i la moyenne pluviométrique ou de débit de la sous-période avant la rupture.

Si $D \geq 0$ alors il y a un excédent pluviométrique ou hydrométrique de la période d'après la rupture par rapport à celle d'avant la rupture. En revanche, si $D < 0$ alors on parle de déficit pluviométrique ou hydrométrique de la période d'après la rupture par rapport à celle d'avant la rupture.

II-3-5. Analyse de la structure spatiale des précipitations

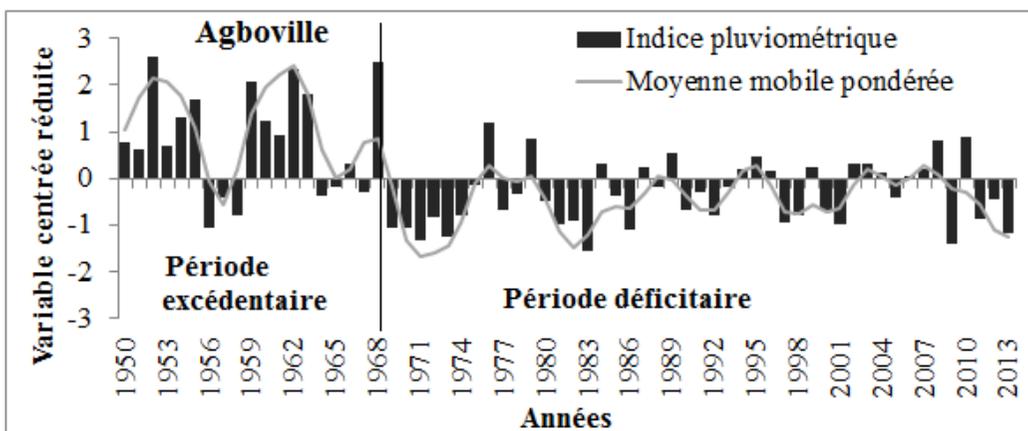
La spatialisation de la pluie moyenne annuelle s'est appuyée sur les hauteurs de pluie annuelles des années 1950 à 2013 de 14 stations dont six localisées sur le bassin versant et les huit autres situées dans les environs du bassin de l'Agneby à Agboville. Le tracé des isohyètes est un élément complémentaire aux méthodes précédentes pour mieux visualiser la variation spatio-temporelle des précipitations sur l'ensemble de la région. On appelle isohyète une courbe d'égale pluviométrie ou courbe d'isovaleur de pluviométrie. C'est le lieu géométrique où il est tombé la même quantité de pluie [17]. Les isohyètes permettent de connaître les limites des secteurs où la pluviométrie est sensiblement homogène. Les données d'entrées sont les pluviométries moyennes annuelles et les coordonnées des points de mesures. L'année de rupture de la pluie moyenne sur le bassin a été utilisée pour la spatialisation de la pluie sur le bassin versant avant et après rupture. Les paramètres du variogramme modélisé pour obtenir la pluie moyenne des 14 stations par la méthode de krigeage sont l'effet de pépité $NE = 0,2$; le seuil $S = 0,9$ et la portée $R = 15$ km [4]. Ainsi, les isohyètes ont été tracés sur les périodes avant rupture (1950-1968) de huit stations pluviométriques (Bongouanou, Abengourou, Céchi, Adzopé, Agboville, Daoukro, Azaguié et Tiassalé) et après rupture (1950-1968) à partir de la pluviométrie moyenne annuelle des 12 stations (Bongouanou, Arrah, M'batto, Akoupé, Adzopé, Agboville, Daoukro, Sikensi, Yakassé – Attobrou, Tiassalé, Abengourou et Montézo).

III - RÉSULTATS

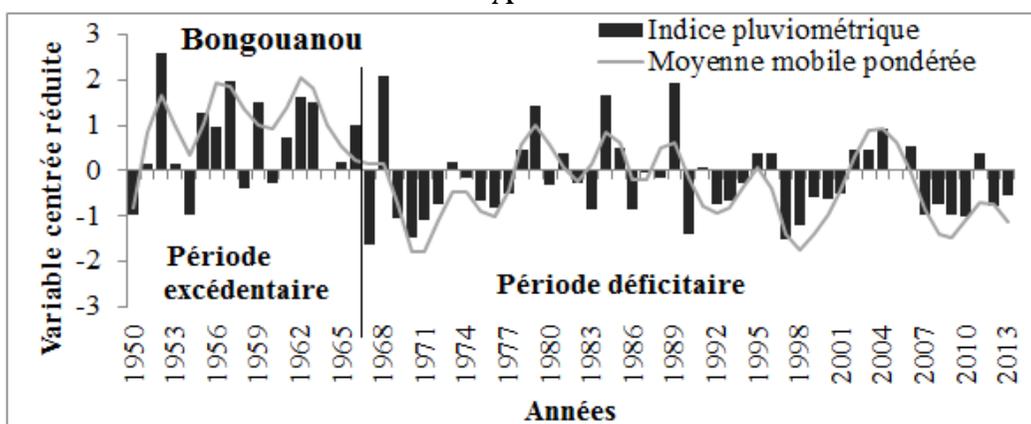
III-1. Caractérisation de la variabilité pluviométrique

Les indices pluviométriques calculés associés à l'élimination saisonnière au moyen du Filtre de Hanning sont illustrés à la **Figure 2**. Elle indique deux grandes sous-périodes sur la période 1950 - 2013 :

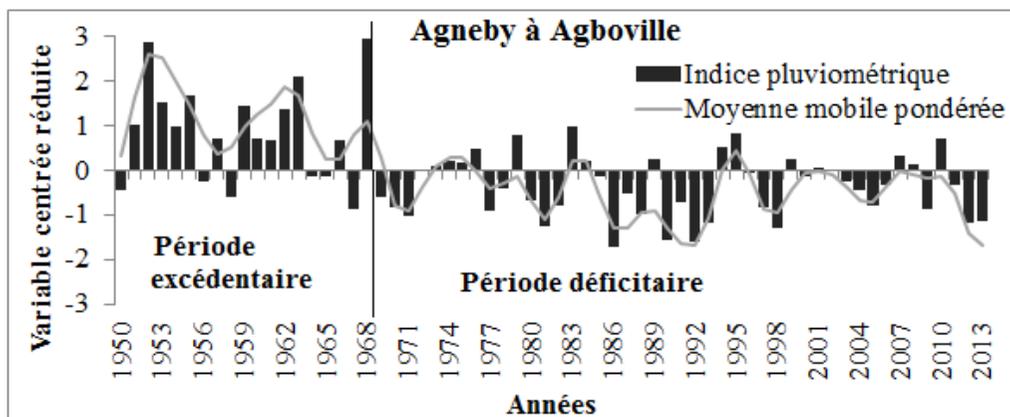
- *une période excédentaire* :
 - 1950-1968 concernant la station d'Agboville (**Figure 2A**) et pour le bassin d'Agneby à Agboville (**Figure 2C**) ;
 - 1950-1966 pour la station de Bongouanou (**Figure 2B**) avec des maxima en 1952 et en 1968 ;
- *une période déficitaire* :
 - 1969-2013 la station d'Agboville (**Figure 2A**) et le bassin d'Agneby à Agboville (**Figure 2C**) ;
 - 1967-2013 relatifs à la station de Bongouanou (**Figure 2B**).



A



B



C

Figure 2 : Indices pluviométriques couplés aux moyennes mobiles : les stations d'Agboville (A) et de Bongouanou (B) et la pluie moyenne Agneby à Agboville (C)

Le **Tableau 4** révèle respectivement 19 % et 20 % d'années excédentaires avant 1968 à Agboville et pour le bassin. Tandis qu'à la station de Bongouanou, il y a 14 % d'années excédentaires et 13 % déficitaires pendant la période excédentaire. Les proportions des années déficitaires sont plus élevées (environ 60 %) que celles des années excédentaires (8 %) après les ruptures de 1966 et 1968.

Tableau 4 : Pourcentages des années excédentaires et déficitaires avant et après rupture dans les séries pluviométriques

Station	Période excédentaire		Période déficitaire	
	% des années déficitaires	% des années excédentaires	% des années déficitaires	% des années excédentaires
Agboville	1950 - 1968		1969 - 2013	
	11	19	62	8
Bongouanou	1950 - 1966		1967 - 2013	
	13	14	62	11
Pluie moyenne du bassin versant Agneby à Agboville	1950 - 1968		1969 - 2013	
	9	20	63	8

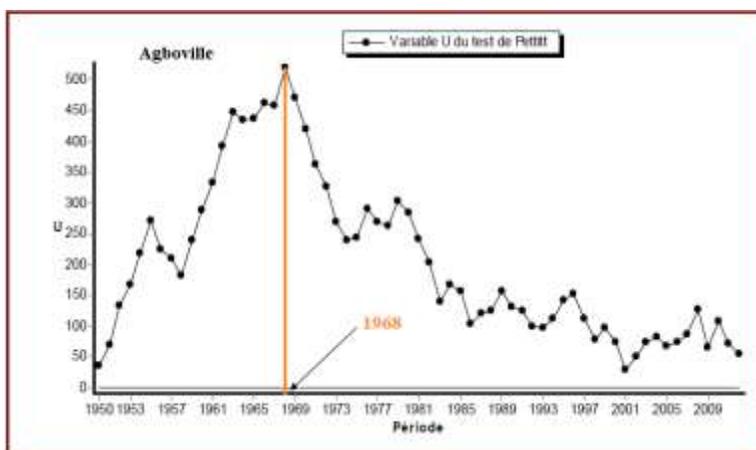
III-2. Ruptures de stationnarité et déficits pluviométriques

Les ruptures soupçonnées par les indices autour de 1966 (Bongouanou) et 1968 (Agboville et Agneby à Agboville) ont été validées par les tests de Lee et Heghinian, de Pettitt ainsi que la segmentation d'Hubert (**Tableau 5**).

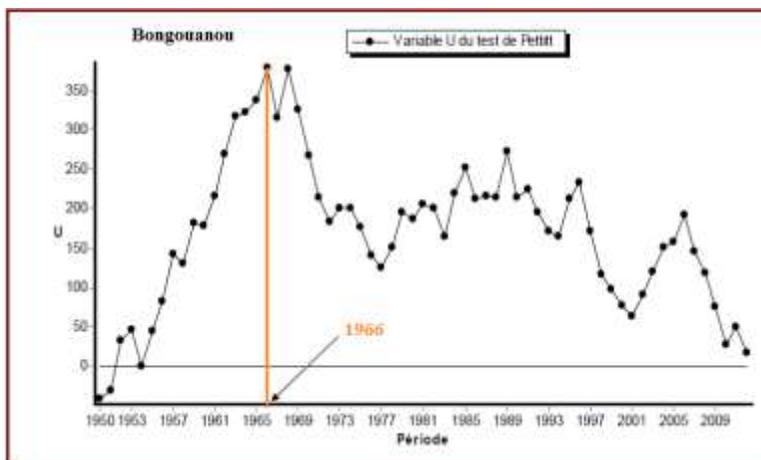
Tableau 5 : Résultats des tests de rupture appliqués aux données pluviométriques

Station	Tests de rupture	Année de rupture	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Déficit (%)
Agboville (1950 - 2013)	Pettitt	1968	1505	1212	20
	Lee et Heghinian	1968	1505	1212	20
	Segmentation d'Hubert	1968	1505	1212	20
Bongouanou (1950 - 2013)	Pettitt	1966	1267	1057	17
	Lee et Heghinian	1966	1267	1057	17
	Segmentation d'Hubert	1968	1158	990	15
Bassin versant Agneby à Agboville (1950 - 2013)	Pettitt	1968	1444	1169	19
	Lee et Heghinian	1968	1444	1169	19
	Segmentation d'Hubert	1968	1444	1169	19

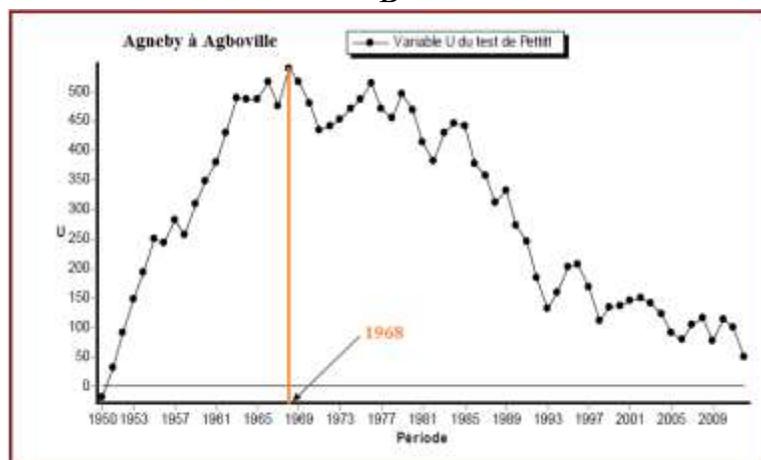
Le test de Pettitt révèle une rupture très significative (**Figure 3**). En effet, il a été obtenu respectivement des valeurs de $\alpha = 5,31 \cdot 10^{-3}$ à Agboville (**Figure 3A**) et $\alpha = 2,94 \cdot 10^{-3}$ pour Agneby à Agboville (**Figure 3C**) très inférieures à 1 %. L'hypothèse nulle d'absence de rupture a été rejetée aux seuils de confiance de 99 %, 95 % et 90 %. La probabilité associée au test montre que les ruptures constatées au sein des séries pluviométriques sont très significatives (seuils inférieurs à 1 %). Les déficits pluviométriques des périodes après rupture par rapport aux périodes avant rupture sont de 20 % à Agboville, 19 % pour le bassin avec les trois tests paramétriques et non paramétriques. De même, la moyenne interannuelle est de 1505 mm avant et de 1212 mm après rupture de 1968.



A



B



C

Figure 3 : *Test de Pettitt appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1950 - 2013) : A- Agboville ; B- Bongouanou et C- Agneby à Agboville*

III-3. Distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles avant et après la rupture de 1968

Les **Figures 4A et 4B** indiquent la répartition spatiale des pluies interannuelles avant et après de 1968 respectivement. L'examen des isohyètes fait apparaître une inégalité dans la distribution spatiale de la pluviométrie dans la région de l'Agneby. Avant la rupture, il apparaît un gradient orienté Sud-Est Nord-Ouest avec les plus fortes pluviométries au Sud-Est. Les hauteurs de pluie oscillent en moyenne entre 1150 mm et 1530 mm. Après la rupture, le sens du gradient se redresse progressivement du Sud jusqu'à la latitude de Céci pour finalement laisser place au signal de la station compte tenu du recourbement des isohyètes autour des stations. La diminution de l'amplitude du signal

pluviométrique se visualise partout sur le bassin avec en particulier des décroissances très fortes touchant notamment les régions d'Akoupé à l'est (1032 mm), le centre du bassin et la zone de Bongouanou (1058 mm) au Nord-Ouest. La pluviométrie annuelle oscille alors entre 1000 et 1200 mm.

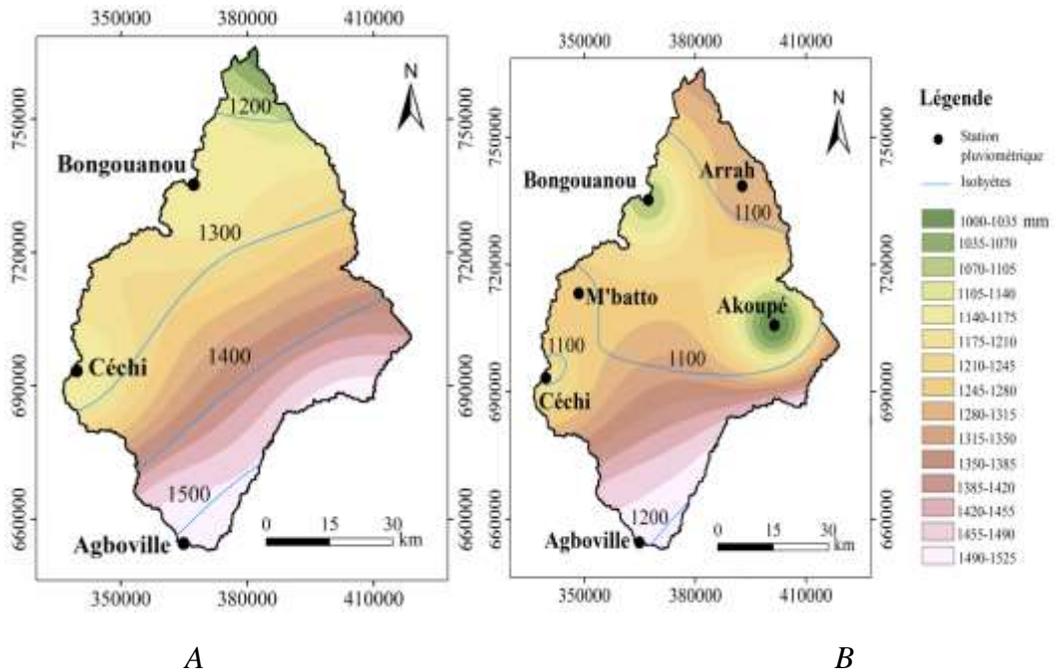


Figure 4 : Spatialisation des pluies moyennes annuelles : A- avant rupture (1950 - 1968) ; B- après rupture (1969 - 2013)

IV - DISCUSSION

IV-1. Variabilité climatique

Les données de pluies annuelles à l'échelle locale puis à l'échelle régionale soumis aux tests statistiques ont mis en évidence :

- une baisse de la pluviométrie et une alternance de périodes excédentaires et déficitaires sur le bassin versant de l'Agneby à Agboville ;
- et une apparition de ruptures en 1966 à la station de Bongouanou et en 1968 à la station d'Agboville et sur le bassin versant de l'Agneby à Agboville.

Ces résultats obtenus sont en accord avec les travaux de [2, 18, 19] sur la climatologie régionale en Afrique de l'Ouest en général et de ceux de [4, 20, 21] en Côte d'Ivoire. Ces ruptures montrent bien que la région d'étude bien que de petite taille a subi la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de

l'Ouest et centrale sahélienne comme non sahélienne [3, 22, 23]. La baisse de l'amplitude du signal pluviométrique pourrait s'expliquer par un dérèglement de la migration saisonnière du Front Inter tropical (FIT) vers le Nord. Ce déplacement du FIT est sous la dépendance du contraste thermique entre le continent et les océans [24]. Les résultats montrent aussi une alternance de périodes excédentaires et déficitaires mise en évidence à l'échelle sous régionale sur des séries pluviométriques longues démarrant depuis le début du vingtième siècle [25]. Ce qui signifie que les récessions pluviométriques observées sur le bassin ne relèvent pas d'un phénomène local mais plutôt d'un signal régional. Les déficits pluviométriques de la période après rupture calculés par rapport à la période avant rupture sont compris entre 15 % et 20 % selon les stations et l'échelle de la région d'étude. En Afrique de l'Ouest, ces déficits pluviométriques sont de l'ordre de 20 %, mais peuvent parfois être supérieurs à 25 % dans les pays comme le Sénégal et le Tchad [22]. Ainsi, ces déficits sont en cohérence avec les valeurs observées au niveau de la sous-région ouest-africaine. Le déficit pluviométrique déterminé dans notre étude à la station d'Agboville (20 %) sur la période 1950 - 2013 est de même ordre avec celui de [20] de la période 1951 - 2002 (19 %) mais supérieur à celui de [26] sur la période 1940 - 2000 (13,3 %). A la station de Bongouanou, le déficit pluviométrique (17 %) à la période 1950 - 2013 est supérieur à celui de [26] sur la période 1940 - 2000 (8,2 %), de [20] sur la période 1951 - 2002 (12 %) et de [27] sur la période 1948 - 2002 (9 %) réalisés en Côte d'Ivoire à la même station et sur le même bassin. Quant à la pluie moyenne sur le bassin de l'Agneby à Agboville (4693,32 km²), ce déficit (19 %) est supérieur à celui trouvé par [20] sur le bassin de l'Agneby (17 %) d'une superficie de 8628,2 km². Ces différences de déficit pluviométrique seraient liées à la longueur des données utilisées.

IV-2. Spatialisation de la pluie sur le bassin versant

L'analyse des cartes de spatialisation des pluies moyennes annuelles avant et après la rupture de 1968 a également montré la baisse de la pluviométrie sur l'ensemble de la région. Avant la rupture, une décroissance des hauteurs annuelles de pluie est observée du Sud vers le Nord du bassin d'étude de 1600 à 1000 mm. Tandis qu'après la rupture, la pluviométrie annuelle se situe entre 1000 et 1250 mm. Les zones les plus intensément touchées par la baisse des précipitations se situent principalement au centre du bassin. Ceci est en accord avec les travaux de [28] en Côte d'Ivoire qui ont montré que la zone pluviométrique délimitée par les isohyètes 1300 mm et 1800 mm a connu une évolution spectaculaire en Côte d'Ivoire entre 1950 et 1980. Après la rupture, nous avons des isohyètes de faibles pluviométries qui varient entre 1000 et 1250 mm. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [29] sur le bassin de la Bagoué avec 1100 et 1200 mm sur les périodes de décennies 1961 - 1970, 1971 - 1980, 1981 - 1990 et 1990 - 2000 marquée par la disparition des isohyètes de fortes pluviométries.

V - CONCLUSION

L'analyse de la variabilité pluviométrique du bassin versant de l'Agneby à Agboville a montré des années de ruptures entre 1966 et 1968 à Bongouanou et Agboville avec des déficits pluviométriques qui fluctuent entre 15 % et 20 %. L'analyse des cartes de spatialisation des pluies moyennes annuelles avant et après la rupture de 1968 a également montré la baisse de la pluviométrie sur l'ensemble de la région. Avant la rupture, une décroissance des hauteurs annuelles de pluie est observée du Sud vers le Nord du bassin d'étude de 1600 à 1000 mm. Par contre, après la rupture, la pluviométrie annuelle se situe entre 1000 et 1250 mm. Les zones les plus intensément touchées par la baisse des précipitations se situent principalement au nord (avant rupture) et au centre (après rupture) du bassin. La baisse de la pluviométrie est due la déforestation et à la surexploitation de la forêt ce qui aura des conséquences importantes sur la disponibilité des ressources en eau dans la région.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), à Mr Srohourou Bernard, Dr DJE Kouakou Bernard et Mr Kanga Isidore pour la mise à disposition des données pluviométriques. Les auteurs remercient également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation et l'amélioration du contenu de cet article.

RÉFÉRENCES

- [1] - E. SERVAT, J. E. PATUREL, N. H. LUBES, B. KOUAME, J. M. MASSON, M. TRAVAGLIO et B. MARIEU, De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Rev. des Sci. l'Eau*, 12 (2) (1999) 363 - 387
- [2] - A. E. LAWIN, A. AFOUDA et L. THIERRY, Analyse de la variabilité du régime pluviométrique dans la région agricole d'Ina au Bénin. *Eur. J. Sci. Res.*, 50 (3) (2011) 425 - 439
- [3] - B. T. A. GOULA, I. SAVANE, B. KONAN, V. FADIKA et B. G. KOUADIO, Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 7 (1) (2006) 1 - 12
- [4] - A. B. P. KOUAKOU, A. E. LAWIN, B. KAMAGATE, A. DAO, I. SAVANE et B. SROHOUROU, Rainfall variability across the Agneby

- watershed at the Agboville Outlet in Côte d'Ivoire, West Africa. *Hydrol. MDPI*, 3 (43) (2016) 1 - 11
- [5] - A. B. P. KOUAKOU, Variabilité climatique, activités anthropiques et réponses hydrologiques du bassin versant de l'Agneby à Agboville (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat Unique, Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire), (2018) 224 p.
- [6] - B. S. ARDOIN, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, (2004) 330 p.
- [7] - K. E. KOUAKOU, Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant de la Comoé. Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé (Côte d'Ivoire), (2011) 186 p.
- [8] - S. E. NICHOLSON, The nature of rainfall fluctuation in subtropical West Africa. *Mon. Weather Rev.*, 108 (4) (1980) 473 - 487
- [9] - M. LE LAY et S. GALLE, Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *J. Sci. Hydrol.*, 50 (3) (2005) 509 - 524
- [10] - E. A. LAWIN, Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données de pluie AMMA CATCH Bénin. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi et INP Grenoble, France, (2007) 165 p.
- [11] - P. D. TYSON, T. G. J. DYER et M. N. MAMETSE, Security changes in South African rainfall : 1880 to 1972. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 101 (430) (1975) 817 - 833
- [12] - A. N. PETTITT, A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.*, 28 (2) (1979) 126 - 135
- [13] - A. F. S. LEE et M. S. HEGHINIAN, A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables : A Bayesian Approach. *Technometrics*, 19 (4) (1977) 503 - 506
- [14] - P. HUBERT, J. P. CARBONNEL et A. CHAOUCHE, Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 110 (3-4) (1989) 349 - 367
- [15] - H. LUBES-NIEL, J. M. MASSON, J. E. PATUREL et E. SERVAT, Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. des Sci. l'Eau*, 11 (3) (1998) 383 - 408
- [16] - G. MAHE et J. C. OLIVRY, Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6 (1) (1995) 109 - 117

- [17] - B. CHUZEVILLE, Hydrologie tropicale appliquée en Afrique subsaharienne. Collection : Maîtrise de l'eau, Ministère de la coopération et du Développement, Ouagadougou, (1990) 275 p.
- [18] - M. BALME, Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, (2004) 168 p.
- [19] - B. KAMAGATE, Ecoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé). Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, (2006) 220 p.
- [20] - T. V. ASSOMA, Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud -est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar. Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire), (2013) 224 p.
- [21] - R. M. N. FOSSOU, T. LASM, N. SORO, T. SORO, G. SORO, O.Z. DE LASME, D. BAKA, O.Z. ONETIE et 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. *Larhyss J.*, (21) (2015) 97 - 120
- [22] - E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME, M. TRAVAGLIO, M. OUEDRAOGO, J. F. BOYER, H. LUBES-NIEL, J. M. FRITSCH, J. M. MASSON et B. MARIEU, Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Int. Assoc., Hydrol. Sci.*, 252 (1998) 323 - 337
- [23] - A. B. YAO, Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire), (2015) 192 p.
- [24] - E. A. LAWIN, A. AFOUDA, M. GOSSET, P. G. OGUNTUNDE et T. LEBEL, Rainfall Variability at Regional and Local Scales in the Ouémé Upper Valley in Bénin. *Int. J. Sci. Adv. Technol.*, 2 (6) (2012) 46 - 55
- [25] - J. E. PATUREL, E. SERVAT, M. O. DELATTRE et H. LUBES-NIEL, Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *J. des Sci. Hydrol.*, 43 (3) (1998) 937 - 945
- [26] - Z. A. KOUADIO, Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo. Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, (2011) 188 p.

- [27] - M. KOÏTA, Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc (France), (2010) 220 p.
- [28] - Y. T. BROU, Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire pour l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université des Sciences et Technologie de Lille, (2005) 212 p.
- [29] - M. M. G. ADJA, E. J. DJEMIN, P. TOHOURI, O. A. F. OKON N'DRI, K. J. KOUAME, P. J. R. JOURDA et J. BIEMI, Variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique par approches statistiques et géo-spatiales et son impact sur l'écoulement des cours d'eau dans le bassin versant de la Bagoé (Nord de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 48 (2) (2020) 284 - 298