

Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin

**Raudace Tagnon NAKOU^{1,6*}, François de Paule CODO¹, Noel Chabi WOROU²,
Luc Ollivier SINTONDJI³, Abdoukarim ALASSANE⁴ et Nicaise YALO⁵**

¹ *Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

² *Ecole Supérieure de Génie Civil Véréchaguine, Laboratoire des Matériaux et Structures (LAMS), 02 BP 0244 Cotonou, Bénin*

³ *Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences Agronomiques, Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau, 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

⁴ *Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE), Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

⁵ *Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences et Technique, Laboratoire de Géologie, Mines et Environnement, 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

⁶ *Lycée Technique Coulibaly, Laboratoire Eau et Assainissement (LEA), 01 BP 370 Cotonou, Bénin*

(Reçu le 03 Octobre 2022 ; Accepté le 23 Novembre 2022)

* Correspondance, courriel : nraudace@yahoo.fr

Résumé

Ce travail qui porte sur la caractérisation des événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve mono au Bénin de 1967 à 2017, s'appuie sur l'approche projet ETCCDI-CLIVAR/JCOMM (Groupe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique) caractérisant les pluies intenses. A cet effet, 7 indices pluviométriques basés sur les observations quotidiennes par station, par année ont été calculés et globalisés à l'échelle du bassin. Ensuite, les indices ont été attachés au filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2 afin de dégager les périodes et des cycles. Les résultats montrent qu'à l'exception de l'indice CDD, les six autres indices (PRCPTOT, R1mm, RX1day, RX5day, R95p, R99p) présentent des tendances à la hausse dont cinq significatives. La pluviométrie, après avoir marqué son retour sur le bassin en 1988, a évolué vers les conditions drastiques à partir de 2009. Sur le bassin, Les évènements pluviaux intenses (R95p) et extrêmes rares (R99p) augmentent très significativement de 3,1 mm/an et de 2,1mm/an respectivement. Cette étude révèle que le changement climatique est l'un des facteurs qui aggrave les inondations dans le bassin ces dernières années et peut être considérée comme un outil d'aide pour des plans d'adaptations et stratégiques.

Mots-clés : *indices, évènements, variabilité pluviométrique, basse vallée, fleuve.*

Abstract

Characterization of extreme rainfall events in the lower Mono river valley in Benin

This work, which focuses on the characterization of extreme rainfall events in the lower mono river valley in Benin from 1967 to 2017, is based on the ETCCDI-CLIVAR/JCOMM (Expert Group on Climate Change Detection and Indices) project approach characterizing intense rainfall. For this purpose, 7 rainfall indices based on daily observations per station, per year were calculated and globalized at the basin scale. Then, the indices were attached to the HANNING low-pass filter of order 2 in order to identify the periods and cycles. The results show that with the exception of the CDD index, the other six indices (PRCPTOT, R1mm, RX1day, RX5day, R95p, R99p) show increasing trends, five of which are significant. Rainfall, after marking its return to the basin in 1988, has moved towards drastic conditions from 2009 onwards. In the basin, the intense (R95p) and rare (R99p) extreme rainfall events are increasing very significantly by 3.1 mm/year and 2.1 mm/year respectively. This study reveals that climate change is one of the factors that aggravate flooding in the basin in recent years and can be considered as a tool to assist in adaptation and strategic plans.

Keywords : *indices, events, rainfall variability, lower valley, river.*

1. Introduction

Le climat étant caractérisé par un état moyen, mais aussi par des variations autour de cet état moyen [1], l'étude de son changement passe donc à la fois par celle de l'évolution des paramètres moyens et par celle des extrêmes [1, 2]. Ainsi, les questions des extrêmes climatiques sont placées depuis quelque temps, au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel et sur l'homme [3]. En Afrique de l'ouest par exemple, les événements inhabituels et extrêmes se sont accrus, a mentionné [4, 5] dans son 3ème et 4ème rapport. La variation des saisons, les inondations particulièrement dévastatrices ont été enregistrées ces dernières années dans plusieurs pays de cette partie de l'Afrique. Les crues éclair survenues en 2012 dans cette zone étaient déclarées les pires depuis 50ans [6]. Ces crues ont causé des décès au Nigeria, au Niger, au Sénégal, au Togo et au Burkina Faso [6]. Le Bénin comme la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest n'est pas épargné du phénomène. Déjà en 2018, son indice mondial de risque aux catastrophes naturelles le classe au 30^{ème} rang à l'échelle mondiale, 8^{ème} en Afrique subsaharienne avec une forte vulnérabilité climatique qui surpasse de 1,9 celle enregistrée en Afrique subsaharienne [7]. La portion Béninoise du Bassin du fleuve mono située au Sud-Ouest (basse vallée) qui jouit d'un climat Béninien [8] et caractérisée par deux saisons sèches et de deux saisons humides s'inscrit dans ce contexte de forte vulnérabilité climatique. En effet, les communautés riveraines de ce bassin, jadis à l'abri de dangers liés au fonctionnement hydrologique du cours d'eau (fleuve Mono) enregistrent depuis les années 2000 des catastrophes d'inondation. Ces inondations qui surviennent sur ce bassin, soient par ruissellement, par débordement et lentes [9], dans un environnement où on assiste à une croissance démographique galopante [10], frappent durement ce bassin causant d'énormes dégâts, aux écoles, aux centres de santé, aux routes, aux marchés, aux lieux de culte, à l'agriculture, à l'assainissement et à d'autres biens et services publics [11]. L'inondation de 2019 a particulièrement fait de dégâts sur le bassin. 59 villages sur 61 constituant la commune d'Athiémé seul ont été sévèrement touchés avec 7 décès par noyade faussant la prévision du rapport d'Evaluation des Besoins Post Catastrophe du gouvernement avec l'appui technique et financier du PNUD qui faisait état de 21 villages à hauts risques d'inondation retenues après les inondations de 2010 [12]. Par ailleurs, les travaux réalisés en 2010 par E. Amoussou avaient déjà enregistré des extrêmes sécheresses sur ce bassin [13]. Ce dernier a aussi subi des assèchements répétitifs [14] (assèchements du fleuve Mono au Sud en 2006, en 2007 et en 2008)

empêchant l'irrigation de la culture de contre saison sur le périmètre rizicole de Dèvé. D'autres part, Il est remarqué que certains ouvrages de mobilisation d'eaux souterraines de l'aquifère le plus captif (Crétacé supérieur) du bassin autrefois permanent, présentent aujourd'hui un régime temporaire. L'accroissement de la population intensifie encore les pressions anthropiques sur des ressources en eaux souterraines déjà fragilisées. Ces événements suscitent des questions sur la part contributive du climat dans ces événements dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin. Des études ont tenté de comprendre l'évolution du climat à partir des extrêmes et son impact sur certains de ces événements dans le bassin du fleuve Mono (Togo-Bénin) en générale. L'évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité / changement climatique réalisée en 2014 [10] à partir de données pluviométriques krigées révèle une augmentation significative de l'intensité des pluies maximales journalières entre 1988 et 2010 dans le bassin versant du fleuve Mono, pouvant engendrer des risques d'inondation. Par ailleurs, des études récentes ont montré au Nord du bassin (Togo), que les perturbations du régime pluviométrique dont dépend celui hydrologique du bassin du Mono sont pour une part des facteurs déterminants dans la vulnérabilité des communautés riveraines aux inondations [15]. Comprendre comment les extrêmes changent sur le Bassin au niveau local (*Figure 1*) pour une planification des mesures d'adaptations appropriées est l'objectif de cette étude. Elle s'appuie sur l'approche projet ETCCDI-CLIVAR/JCOMM (Groupe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique) caractérisant les pluies intenses [16] pour analyser les événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve mono au Bénin de 1967 - 2017.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

Située entre les parallèles $6^{\circ}25'$ et $7^{\circ}75'$ de latitude nord et le méridien $1^{\circ}03'$ et $2^{\circ}25'$ de longitude est, la basse vallée du fleuve Mono au Bénin est située au Sud-Ouest du Bénin à l'interface de deux systèmes hydrologiques marin et fluvial [9] (figure1). D'une superficie de 2267 Km^2 [9], cette portion Béninoise du bassin versant du fleuve Mono, objet de notre étude, affleure l'aquifère le plus capté du bassin (Crétacé supérieur), qui couvre une superficie de $707,10 \text{ Km}^2$ partagée entre les 6 communes du département du Couffo et la commune de Lokossa dans le département du Mono [17]. Elle est limitée au nord par le bassin de l'Ouémé, au sud par l'océan Atlantique, à l'ouest par la République Togolaise et à l'est par le bassin versant du Couffo et le lac Ahémé. Il est drainé par le fleuve Mono qui prend sa source dans les Monts Alédjo au nord du Bénin, traverse le Togo et se jette dans l'Océan Atlantique par la passe appelée la "Bouche du Roi" à Grand-Popo [13].

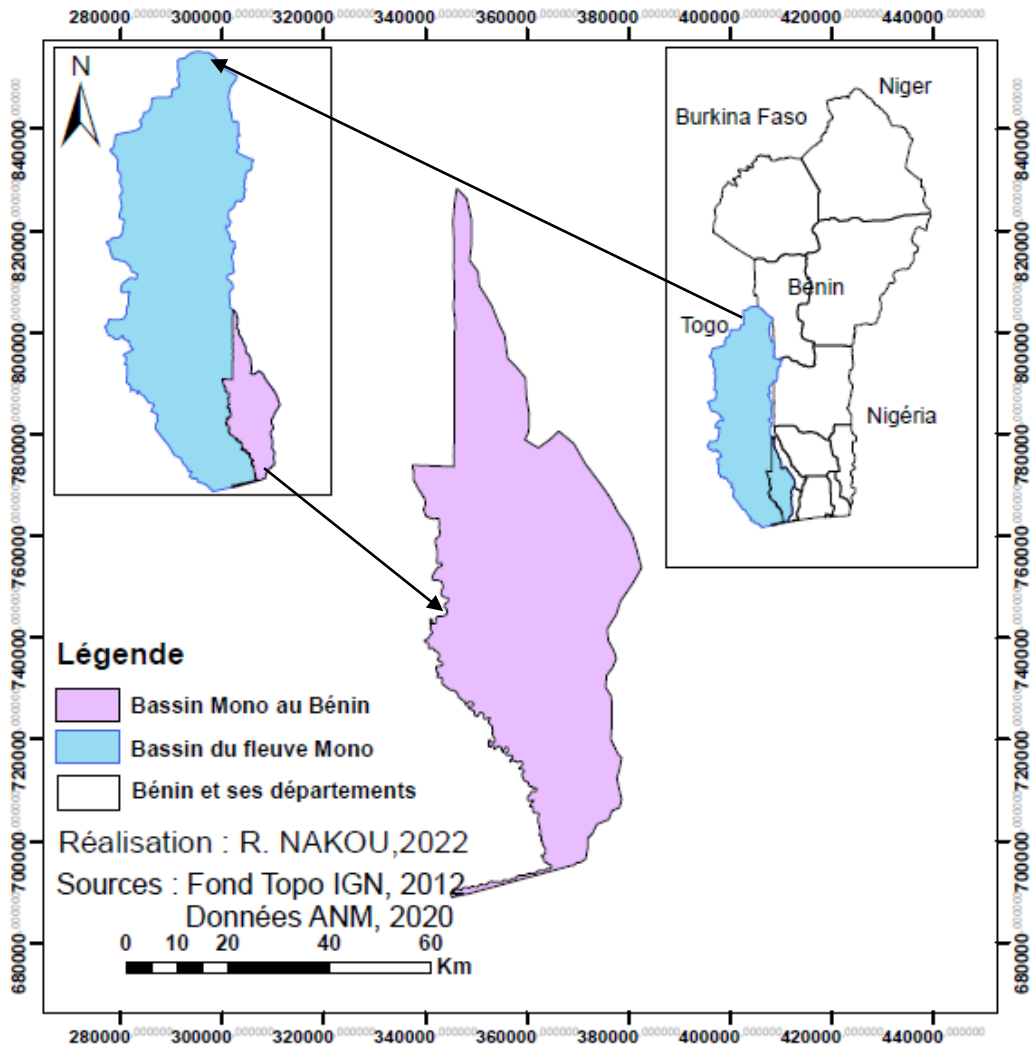


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Basse vallée du fleuve Mono au Bénin)

2-2. Données

Ce travail de recherche a été possible grâce à la collecte des données de précipitations journalières observées de 1966 à 2018 au niveau de 8 stations pluviométriques *installées* autour et dans le bassin du fleuve Mono au Bénin (*Figure 2*). Ces données sont collectées auprès de la Météo-Bénin.

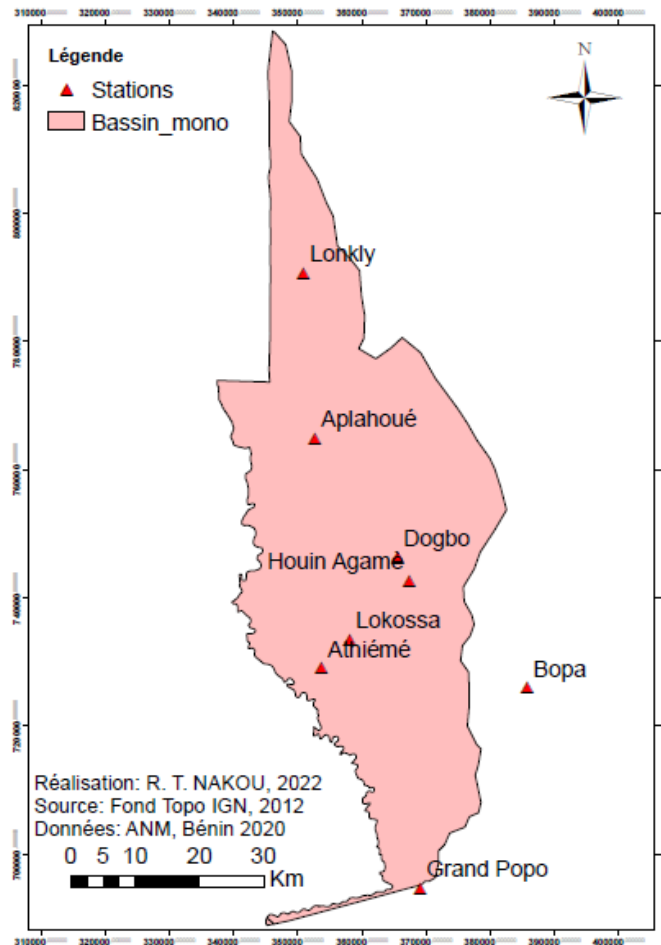


Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques de la basse vallée du fleuve Mono au Bénin

2-3. Méthodes

2-3-1. Calcul des indices de Précipitations extrêmes

7 indices de précipitations extrêmes ont été calculés et analysés pour caractériser les événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve Mono. Ces indices sont : les précipitations totales annuelles (PRCPTOT), le nombre de jours pluvieux (R1mm), la précipitation maximale journalière dans un mois (RX1day), la précipitation maximale de 5 jours consécutifs dans un mois (RX5day), les précipitations intenses (P95p), les précipitations extrêmes rares (P99p) et le nombre de jours consécutifs secs (CDD). La méthode utilisée est l'approche projet ETCCDI-CLIVAR/JCOMM (Groupe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique) caractérisant les pluies intenses. Les sept indices calculés caractérisant les pluies intenses sont définis comme suit par le groupe d'expert ETCCDI :

- Rx1day, Monthly maximum 1-day précipitation : la pluie journalière maximale d'un mois donné ;
- Rx5day, Monthly maximum consecutive 5-day précipitation : le maximum de la quantité de 5 jours de pluie successifs d'un mois donné ;
- R1mm, Annual count of days when PRCP = 1mm : correspond au nombre de jours de pluies supérieures à 1mm par an ;
- R95pTOT, Annual total PRCP when RR > 95p ; (RR = 1.0 mm) : il s'agit du nombre de jours de pluie du 95ème percentile, c'est-à-dire le nombre de jours de pluie supérieure à la valeur de pluie du 95ème percentile d'une période donnée ;

- R99pTOT, Annual total PRCP when RR > 99p : il s'agit du nombre de jours de pluie du 99ème percentile, c'est-à-dire le nombre de jours de pluie par an supérieur à la valeur de pluie du 99ème percentile d'une période donnée ;
- PRCPTOT, Annual total precipitation in wet days (> 1 mm) : cet indice correspond à la quantité des pluies journalières supérieure à 1 mm par an.
- CDD, Consecutive dry days: Plus longue période sec (PRCP < 1 mm)

2-3-2. Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2

Le Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2 a été appliqué sur les indices des pluies intenses afin d'obtenir une meilleure observation des fluctuations des indices en éliminant les fortes variations. Cette méthode recommandée par ASSANI (1999) [18] et été appliquée en 2011 dans le degré carré de Grand-Lahou (sud-ouest de la Coté d'Ivoire) [19] et en 2016 sur le bassin du fleuve Ouémé (Bénin) [20] a produit de très bon résultat. Les **Équations** recommandées par ASSANI sont :

$$X_{(t)} = 0.06x_{(t-2)} + 0.25x_{(t-1)} + 0.38x_{(t)} + 0.25x_{(t+1)} + 0.06x_{(t+2)} \text{ pour } 3 \leq t \leq n-2 \quad (1)$$

$X_{(t)}$ étant le total pluviométrique pondéré du terme t, $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ les totaux pluviométriques de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t, $x_{(t+2)}$ et $x_{(t+1)}$ les totaux pluviométriques de deux termes qui suivent immédiatement le terme t.

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes $X_{(1)}$ et $X_{(2)}$ et des deux derniers termes $X_{(n-1)}$ et $X_{(n)}$ de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes.

$$X_{(1)} = 0.54x_{(1)} + 0.46x_{(2)} \quad (2)$$

$$X_{(2)} = 0.25x_{(1)} + 0.50x_{(2)} + 0.25x_{(3)} \quad (3)$$

$$X_{(n-1)} = 0.25x_{(n-2)} + 0.50x_{(n-1)} + 0.25x_{(n)} \quad (4)$$

$$X_{(n)} = 0.54x_{(n)} + 0.46x_{(n-1)} \quad (5)$$

3. Résultats

3-1. Indice sur les précipitations totales annuelles (PRCPTOT)

Les précipitations totales annuelles sont mises en relief sur la **Figure 3**. Trois courbes sur cette figure permettent d'analyser les précipitations totales annuelles dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin. La première (courbe en bleue) renseigne sur la variabilité des précipitations totales annuelles (PRCPTOT), la deuxième, le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 (courbe en rouge) permet filtrer la première afin d'éliminer sa forte variabilité pour dégager des tendances claires sur les indices de précipitations totales annuelles (PRCPTOT). La troisième (courbe noire en pointillée) met en évidence la tendance sur l'indice de précipitations totales annuelles (PRCPTOT) par année sur la période d'étude. La courbe noire en pointillée indique une tendance significative (P-value < 0,05) à la hausse 4,4mm par an soit 44mm par décennie. Les maxima pics ont été enregistrés dans les années 1968 (1782,68 mm), 1988 (1368,82 mm) et 2010 (1320,8 mm) et les minima

pics dans les années 1977 (557,66 mm) et 1983 (566,06 mm). Le filtre passe-bas de Hanning (courbe rouge) permet de dégager deux phases de cette figure (Période 1 et 2). La première, de 1967-1987 est marquée par une baisse des pluies de 15,37 mm/an soit 153,70 mm par décennie (**Figure 4A**). Cette phase qui semble se décomposer en deux cycles : humide au début de la série (1967 - 1970) et sec entre 1971 et 1987 est caractérisée par deux années (1977 et 1983) extrêmement sèches. La deuxième phase (1988 - 2017) quant à elle, est marquée par une tendance à la hausse de précipitations totales de 3,90 mm/an (**Figure 4B**). Cette phase caractérisée par une pluviométrie très variable, est ponctuée par trois années extrêmement humides (1988, 2010 et 2014). Les années 2000 ont connu une pluviométrie marquée par une tendance générale beaucoup plus humide.

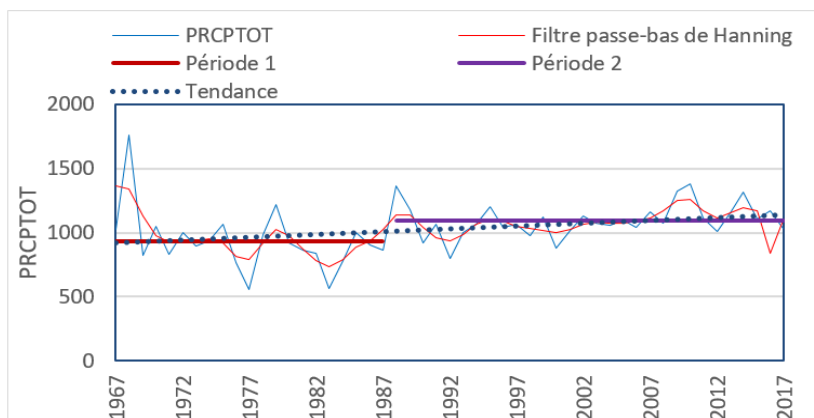


Figure 3 : Variabilité de l'indice de précipitation totale

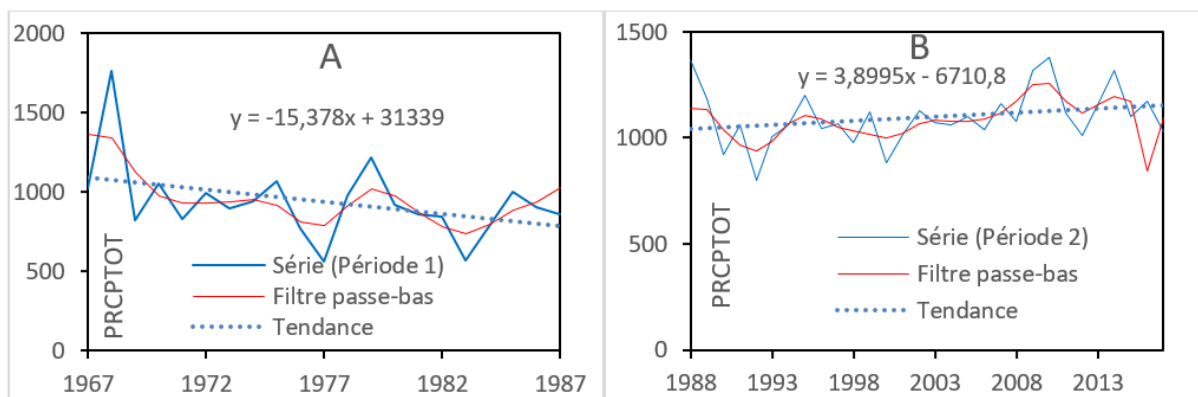


Figure 4 : Évolution de l'indice de précipitation totale pendant chaque phase

3-2. Indice sur le nombre de jour pluvieux (R1mm)

Le nombre de jour pluvieux (R1mm) est illustré sur la **Figure 5**. Ce graphe montre une hausse du nombre de jour pluvieux (R1mm) dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin. La tendance sur l'indice du nombre de jour pluvieux (R1mm) est de 0,05 jour/an (ligne noire en pointillée). Cette tendance est statistiquement non significative ($p\text{-value} > 0,05$). Les jours pluvieux augmentent de 0,5 jour par décennie. Les années ayant reçues le maximum de jour pluvieux (R1mm) sont 1968 (90 jours), 1979 (75jours), 1988 (73jours), 1991 (72jours), 1995 (76jours), 1999 (76jours), 2007 (70jours), 2008 (71jours) et 2010 (71jours). Par compte, les plus faibles jours pluvieux ont été enregistrées au cours des années 1977 (46 jours), 1983 (40jours) et 1984 (55jours). Le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 (courbe en rouge) dévoile 3 phases (déterminées graphiquement). La première 1967 - 1991 est marquée par une baisse 0,17jour/an (**Figure 6A**) du nombre de jour pluvieux avec

une moyenne de 68,10 jours/an sur la période. La deuxième (1992 - 2011) quant à elle présente par une faible variabilité (**Figure 6B**) du nombre jour pluvieux avec une moyenne de 66,61 jours/an. La troisième qui démarre de 2012 à 2017 est marquée par une tendance légèrement à la hausse de 0,5jour/an (**Figure 6C**) du nombre de jour pluvieux. La moyenne du nombre de jour pluvieux sur cette période est de 58,80 jours/an.

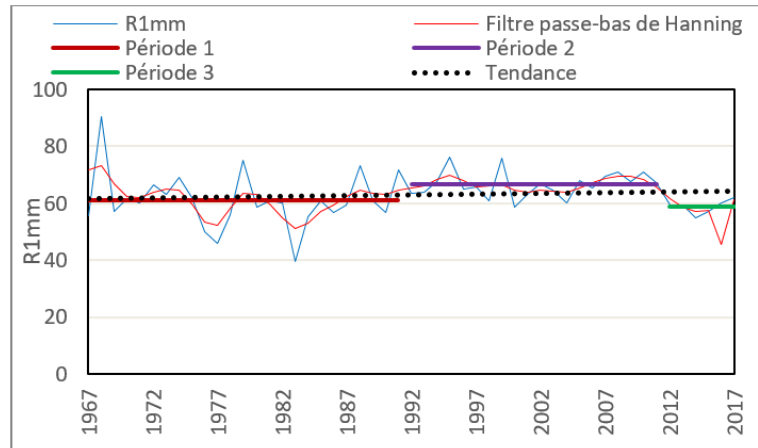


Figure 5 : Variation annuelle du nombre de jour avec pluie sur le bassin

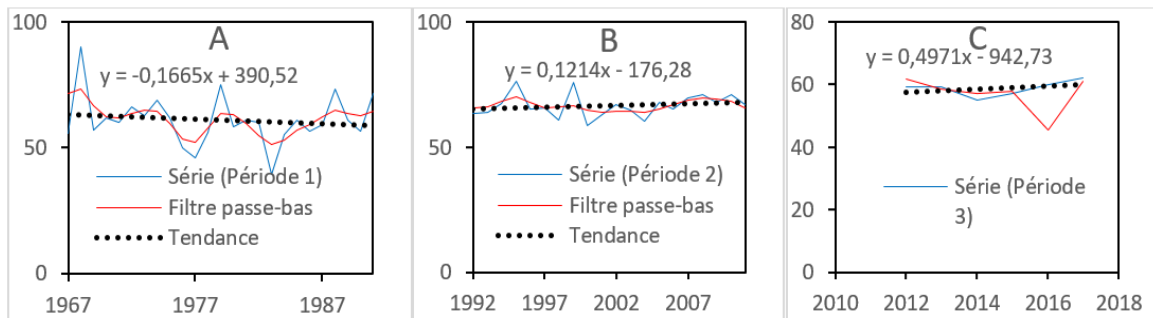


Figure 6 : Évolution annuelle du nombre de jour avec pluie sur le bassin pendant chaque phase

3-3. Indice de précipitation totale maximale d'un jour (RX1day) et de 5 jours consécutif de pluie dans un mois (RX5day)

Les indices de précipitation totale maximale d'un jour et de 5 jours de pluie successive dans un mois sont mis en évidence sur les **Figures 7 et 8**. Ces indices présentent tous, une forte variabilité. La tendance au niveau de ces indices à la hausse respectivement de 4mm par décennie (**Figure 7A**) pour l'indice RX1day et de 7mm par décennie (**Figure 7B**) pour l'indice RX5day. Ces hausses sont statistiquement significatives. Les maxima pics de l'indice de précipitation totale maximale d'un jour (RX1day) sont enregistrés au cours des 1979 (123,96 mm), 1996 (123,48 mm), 2010 (119,04 mm), 2015 (112,249 mm), et 2016 (119,04). L'indice de précipitation totale maximale de 5 jours consécutif de pluie dans un mois (RX5day) a pour sa part enregistré les maxima pics en 1968 (167,74mm), 1979 (148,1mm), 1988 (149,1 mm), 1996 (156,74 mm), 2007 (151,84 mm), 2009 (165,28 mm), 2010 (168,54 mm), 2015 (173,67 mm), 2016 (173,67 mm), 2017 (173,67 mm). On remarque une occurrence de pics après les années 2010 pour ces deux types d'indices. Pour l'indice RX5day les pics sont apparus 3ans plutôt. Le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 n'a pas permis de détecter des phases claires pour ces deux indices. C'est pourquoi, nous avons eu recours au test de segmentation de Hubert (1989) [21] qui a détecté un point de rupture pour chaque indice, dévoilant ainsi deux phases sur la période d'étude pour chacun des indices. Ainsi, l'indice RX1day a connu un point de rupture en 2008. L'indice RX5day

quant à lui, a connu sa rupture 5ans plus tard (2013). Nous retrouvons donc deux périodes pour chaque indice : de 1967 - 2008 et 2009 - 2017 pour l'indices RX1day et de 1967 - 2013 et 2014 - 2017 pour l'indices RX5day (Figure 7A et 7B). La première déficitaire de pluie maximale d'un jour et de 5 jours de pluie successive dans un mois est caractérisée par une forte variabilité des indices avec une tendance à la hausse. Cette tendance est de 0, 14mm/an pour l'indices RX1day et de 0,34mm/an pour l'indice RX5days (Figure 8A et 8C). La deuxième phase (période) caractérisée par des excédents de pluie maximale d'un jour et de 5 jours de pluie successive dans un mois est ponctuée des maxima pics quel que soit l'indice. La tendance à la hausse est d'environ 1,4 mm/an quel que soit l'indice (Figure 8B et 8D). Même si elle est ponctuée de quelques minima pics au niveau de l'indice RX1day est la période la plus humide au niveau de ces deux indices.

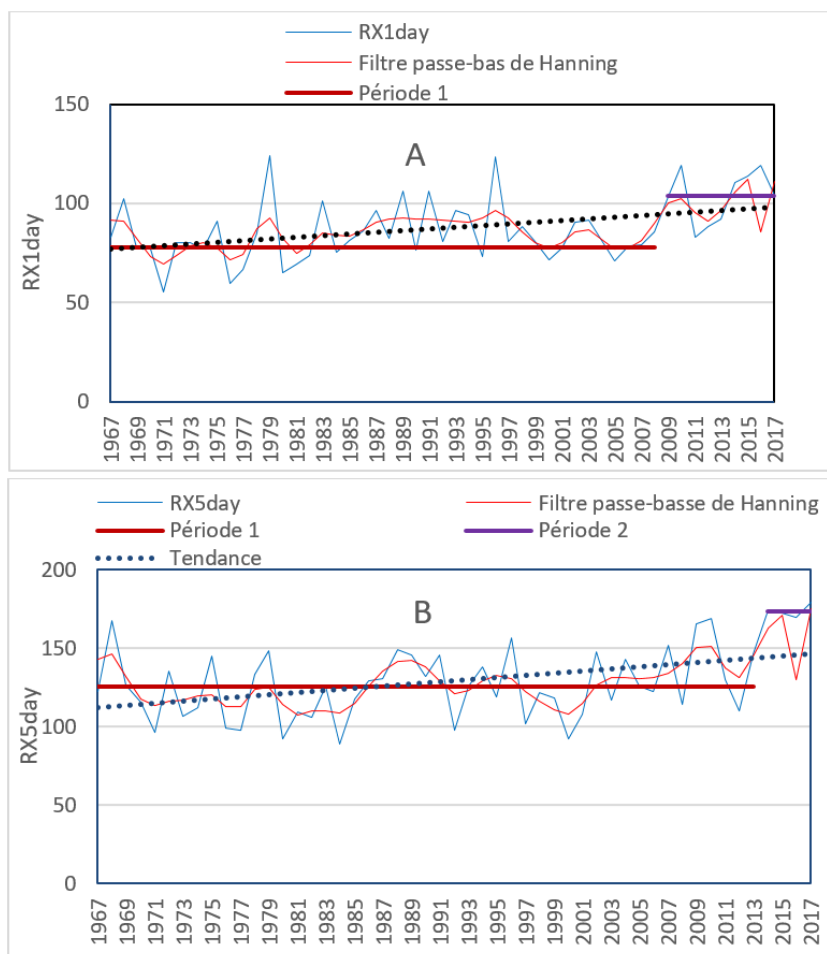
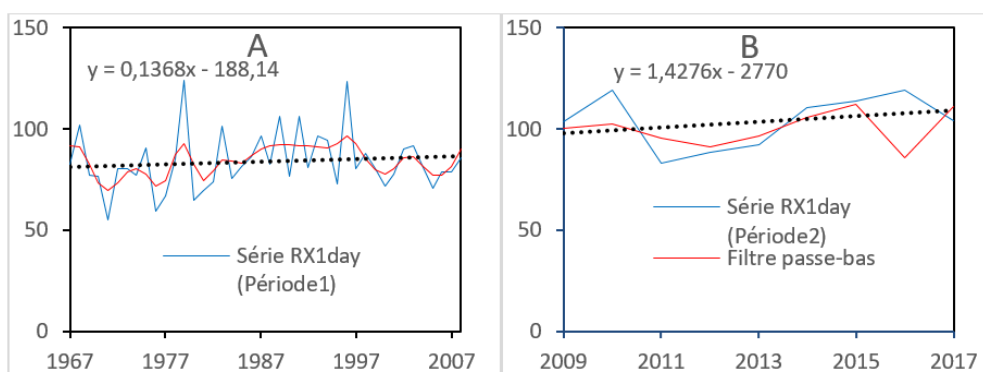


Figure 7 : Variabilité de l'indice de précipitation totale maximale d'un jour et de 5 jours dans un mois



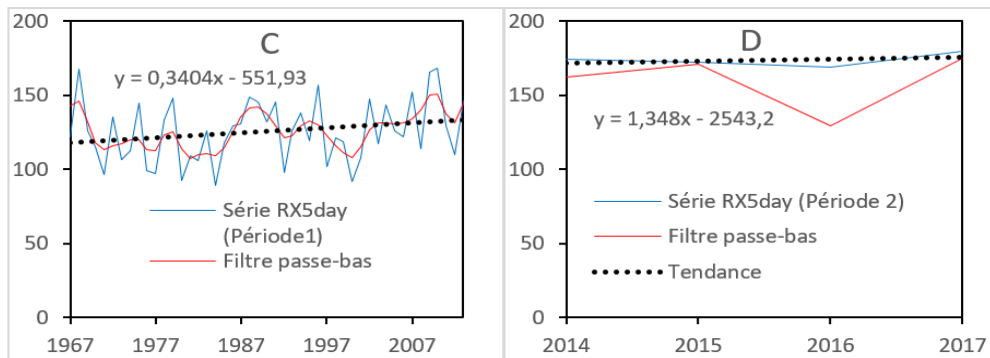


Figure 8 : Évolution de l'indice de précipitation totale maximale d'un jour et cinq jours dans un mois pendant chaque phase

3-4. Indice de précipitations intenses et précipitations extrêmes (R95p et R99p)

Le R99p et le R95p calculés ici pour la période d'étude représentent respectivement les cumuls annuels des précipitations journalières au-dessus du percentile 99 et 95 représentant les jours extrêmement humides et intensément humides. Ces indices sont mis en évidence sur les **Figures 9A et 9B**. La tendance est très significativement ($P\text{-value} < 0,001$) à la hausse aux événements extrêmement humides et intensément humides sur le bassin. Cette tendance est de 2,04 mm/an, soit 20,4 mm/décennie et 204 mm en 100 ans pour l'indice R99p et de 3,10 mm/an, soit 31 mm en 10 ans et 310 mm en 100 ans pour l'indice R95p. Les années ayant reçues les maxima pics de R95p sont 1968 (399,02 mm), 1979 (343,24 mm), 1988 (302,64 mm), 1989 (308,72 mm), 2003 (331,8 mm), 2010 (444,02 mm), 2013 (356,930 mm), 2016 (371,408 mm) et 2017 (371,408 mm). Quant aux événements extrêmement humides R99p, les maxima pics se retrouvent en 1979 (106,6 mm), 1989 (166,26 mm), 1996 (125,58 mm), 2010 (139,28 mm), 2013 (178,38 mm), 2014 (214,6 mm), 2015 (204,64 mm), 2016 (195,1 mm), 2017(205,83 mm). L'on constate une récurrence des maxima pics après les années 2010 quel que soit le type d'évènement. Le filtre passe-bas de Hanning dévoile deux phases pour chacun de ces évènements. En effet, la première phase commence de 1967 et finit en 2008 pour l'indice R95p (**Figure 10A**) alors qu'elle finit en 2013, 5 ans après pour l'indice R99p (**Figure 10B**). Cette phase est marquée par une forte variabilité d'humidité extrême et intense avec des maxima qui coïncident (**Figure 9A et 9B**). La tendance est à la hausse pour les deux indices au cours de cette phase.

Elle est 0,36 mm/an (**Figure 10A**) pour l'indice R95p et 0,74 mm/an (**Figure 10C**) pour l'indice R99p. L'année 1968 constitue une année historique en termes d'humidité intense alors que celle de 1989 est la pire en termes d'humidité extrême durant cette phase. 5 années (1971, 1974, 1977, 1980 et 2005) n'ont pas connu d'humidité extrême durant cette phase. L'indice R99p est nul au cours de ces années et la plupart de ces années coïncident avec les minima pics de l'indice R95p sauf l'année 2005. Pour l'indice R95p, l'année 1983 est celle qui affiche la plus petite valeur pic qui marque l'année de la grande sécheresse sur ce bassin. Cette même année a été trouvée par Amoussou (2010) [13]. La deuxième phase quant à elle, commence à partir de 2009 et finit en 2017 pour l'indice R95p alors qu'elle est 2014 à 2017 pour l'indice R99p. Cette deuxième phase affiche deux tendances opposées. La tendance est très significativement à la hausse pour l'indice R99p et à la baisse pour l'indice R95p. Elle est de 35,41 mm (**Figure 10D**) par décennie durant cette phase en termes d'évènements extrêmement humides et de 42,50 mm (**Figure 10B**) en termes d'évènements intensément humides. Même si la tendance est à la baisse au niveau de l'indice R95p, cette phase est très marquée et des années intensément humides qui coïncident avec les années extrêmement humides. Ainsi les années 2010, 2014 et 2017 ont connu les pires humidités intenses et extrêmes.

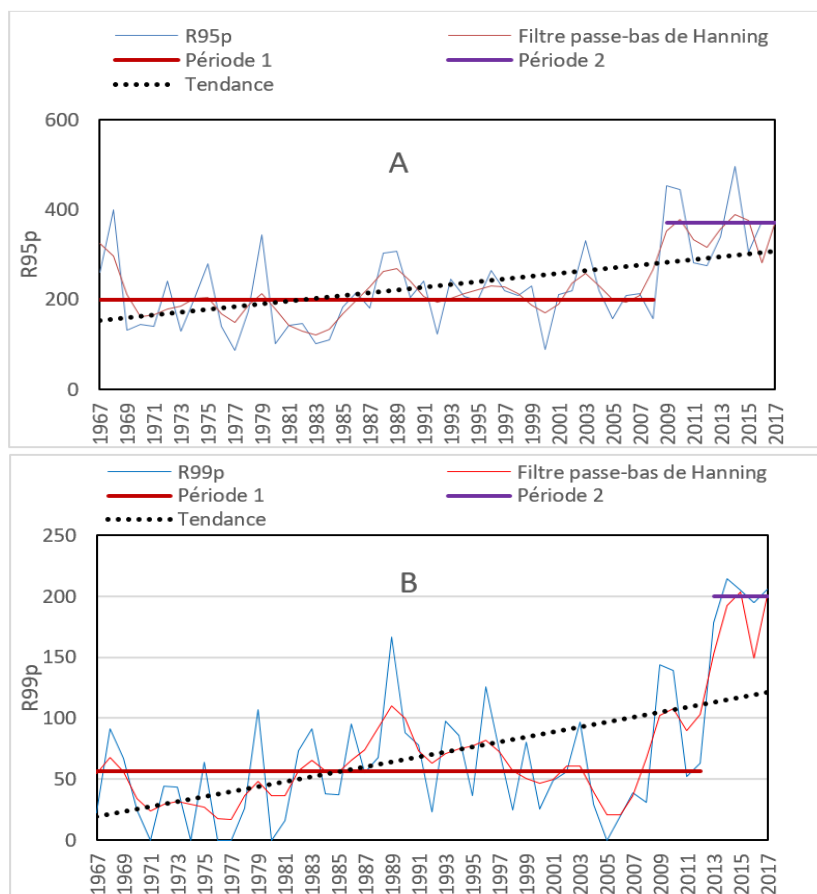


Figure 9 : Variabilité de l'indice de précipitations intenses et précipitations extrêmes

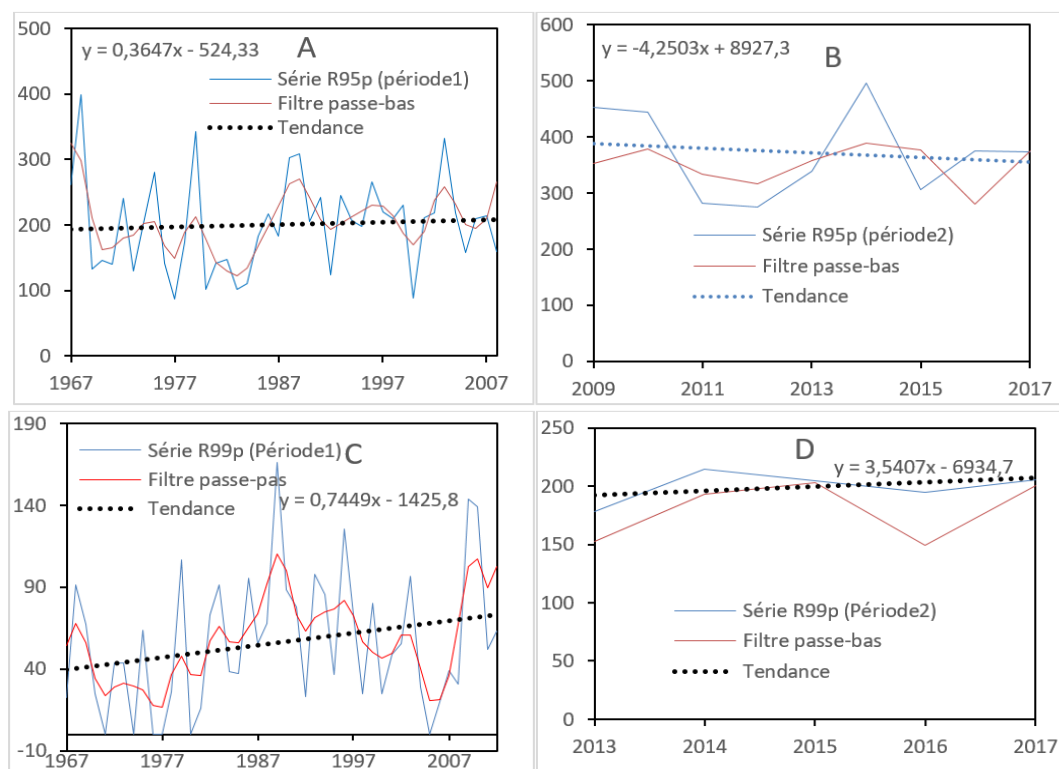


Figure 10 : Évolution de l'indice de précipitations intenses et précipitations extrêmes (R95p et R99p) pendant chaque phase

3-5. Indice des jours consécutivement secs (CDD)

L'indice CDD représente le nombre maximal des jours consécutivement secs. C'est-à-dire le nombre maximal des jours consécutivement où les précipitations sont inférieures à 1 mm. Cet indice est mis en évidence par la **Figure 11**. La droite de tendance montre une baisse non significative de cet indice de 0,098jour/an sur le bassin. Cet indice baisse donc de 0,98 jour/décennie en moyenne sur le bassin soit 9,8jour/an en 100 ans et ne présente aucune rupture. Par compte, il possède des valeurs élevées en 1969 (87,2 jours), 1983 (131,4 jours), 1985 (93,8) et 2015 (94,8 jours) avec une moyenne de 67,201 jours/an sur la période d'étude. L'année 1983 a enregistré à elle seule deux fois environ, la moyenne (67,201 jours/an) du nombre maximal des jours consécutivement secs enregistré au cours de la période d'étude. En conséquence c'est l'année la plus déficitaire en pluviométrie dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin au cours de la période d'étude.

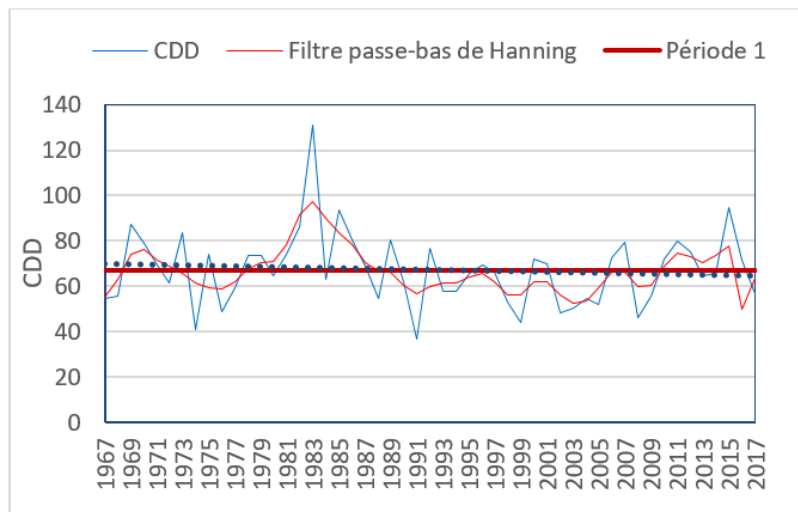


Figure 11 : Variabilité de l'Indice des jours consécutivement secs

4. Discussion

Cette étude révèle une tendance significative à la hausse de 4,4 mm par an des précipitations totales annuelles (PRCPTOT) dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin. Cette même tendance est observée sur l'indice du nombre de jour pluvieux (R1mm) à la différence qu'elle est non significative de 0,5 jour/an. Par compte, L'indice sur le nombre maximal des jours consécutivement secs présente une tendance à la baisse non significative 0,098jour/an sur le bassin. Cette situation explique une légère augmentation de la saison des pluies et une légère diminution de la saison sèche. Ces résultats sont contraires à la tendance qui s'observe en générale dans la partie ouest Africaine. En effet plusieurs chercheurs ont montré une baisse des précipitations totales annuelles et du nombre de jours pluvieux au Niger, au Burkina-Fasso, au Sénégal, au Mali, au Nigéria [22 - 27]. Ces modifications des saisons sur le bassin, même si elles sont légères marquent déjà leur influence sur le fonctionnement hydrologique du fleuve Mono dans le bassin. La hausse des précipitations totales annuelles sur ce bassin, quant à elle, s'explique par le retour aux conditions humides à partir de l'année 1988 qui coïncide avec l'année de la mise eau du Barrage de Nangbéto qui se trouve au Nord du Bassin. Cet ouvrage a sans doute contribué à ce retour aux conditions pluvieux dans la basse vallée du fleuve au Bénin. Le même constat a été fait en 2010 sur le bassin du fleuve Mono (Togo-Bénin) [13]. Par compte la période avant 1988 (**Figures 4A et 5A**) montre une tendance à la baisse très significative de 15,40 mm/an des précipitations totales annuelles et non significative de 0,17jours/an du nombre de jours pluvieux sur le

bassin. La tendance observée avant cette année 1988 cadre parfaitement à celle observée dans le Sahel [28], dans les pays du Golfe de Guinée, de l'Afrique centrale [29] et de l'Afrique de l'ouest. Cette baisse des précipitations totales annuelles et du nombre de jours pluvieux observée avant l'année 1988 explique le raccourcissement de la saison des pluies et le prolongement des saisons sèches sur le bassin. Ces résultats confirment ceux obtenus en 2019 sur le bassin béninois du fleuve Niger [30], ceux obtenus en 2017 sur le bassin de la Mékrou [31], ceux de 2016 sur le bassin Béninois du fleuve Ouémé [20] et ceux de 2022 dans les vaudoises Alps en Switzerland [32]. Cette baisse est encore plus marquée, entre 1971 à 1987 ou des années très déficitaires ont été enregistrées. L'année 1983 est la plus touchée. Le même résultat avait été obtenu en 2010 par Amoussou qui a qualifié cette année « exceptionnellement déficitaire en amont à Athiémé » [13]. Cette année (1983) a enregistré la plus petite valeur indice sur les précipitations totales annuelles (**Figure 3**), la plus petite valeur indice sur nombre de jours pluvieux (**Figure 5**) et la plus forte valeur indice sur les jours consécutivement secs (**Figure 11**). Cette condition très sèche enregistrée dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin entre 1971 - 1987 et qui confirme la péjoration climatique qui a affecté la région [13], s'apparente à celle enregistrée sur le reste de l'Afrique, où les années très déficitaires se sont multipliées pendant les décennies 1970 et 1980. Les travaux du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GEIEC) en 2007 [33] ont détecté que, cette région a enregistré la plus grande sécheresse du vingtième siècle entre 1970 et 1990. Les mêmes résultats sont obtenus au Nord du Bénin, sur le bassin béninois du fleuve Niger [34]. Ces auteurs ont montré que les déficits pluviométriques des décennies 90, 80 et 70 sont respectivement de 47 mm, 70 mm et 88 mm par rapport à la moyenne et par rapport à la sous période 1969 - 1986, elle est de 110 mm. Même si la phase déficitaire qu'a connu le bassin entre 1967-1987 est ponctuée de quelques années humides, elle explique la dégradation des états de surfaces où les superficies des forêts-galeries et forêts denses ont connu une régression au même titre que les forêts claires et les savanes boisées, les cultures-jachères à palmiers et les fourrés marécageux qui ont pu entraîner une diminution de l'évaporation et donc une diminution du déficit d'écoulement [13].

L'année 1968 est la plus marquée sur le bassin. Les pluies ont été très abondantes au cours de cette année avec un indice sur les précipitations totales annuelles (PRCPTOT) de 1782,68mm. Cette même année excédentaire avait été obtenue en 2010 par Amoussou qui a évalué l'excédent pluviométrique de 43 % par rapport au cumul annuel moyen de 1961 - 2000 sur le bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) [13]. Cette augmentation des précipitations en 1968 semble être liée à l'augmentation de la température de surface océanique au sud de l'Atlantique [35]. Cette année a connu 90 jours de pluies qui représentent le maximum du nombre de jours pluvieux au cours de la période d'étude (**Figure 4**). C'est l'année la plus intensément humide au cours de la période d'étude. La plus grande valeur (399,02 mm) de l'indice de précipitations intenses (R95p) a été enregistrée en cette année-là au cours de la période d'étude. La deuxième phase qui débute en 1988 et finit en 2017 ou l'année 1988 marque le retour à la pluviométrie sur le bassin est marquée par une occurrence d'évènements extrêmement humides et intensément humides à partir de 2010. Déjà en 2010 les travaux de Amoussou [13] avaient noté une légère augmentation des précipitations de 2 %, soit 30,96 mm de 1988 à 2000 en amont de la station hydrométrique d'Athiémé qui contribué à une augmentation du débit de l'ordre de 30 % dans cette portion du Bassin du fleuve Mono. Durant cette période (1988 - 2017), la pluviométrie, après avoir marqué son retour en 1988, évolue vers les conditions drastiques après 2009 (**Figure 9**). Cette situation explique en partie les inondations dramatiques enregistrées sur le bassin ces dernières années. La tendance à ces évènements extrêmement humides (R99p) et intensément humides (R95p) étant très significativement (P-value < 0,001) à la hausse sur le bassin, on devrait s'inquiéter à l'avenir de la nature des inondations et des catastrophes dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin.

5. Conclusion

Cette étude s'appuie sur l'approche projet ETCCDI-CLIVAR/JCOMM pour caractériser les événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve mono. Six des sept indices calculés à savoir : l'indice PRCPTOT, R1mm, RX1day, RX5day, R95p et R99p révèlent une tendance à la hausse respectivement de 4,4 mm/an, de 0,05 jour/an, de 0,4mm/an, de 0,7 mm/an, de 3,1 mm/an et de 2,04 mm/an dont 5 significativement. L'indice des jours consécutivement secs (CDD) qui présente une tendance de 0,098 jour/an à la baisse est statistiquement non significative. Ces tendances qui permettent de Comprendre comment les extrêmes évoluent sur le Bassin sont contraire à ce qui s'observe en Afrique de l'ouest en générale. La tendance à la hausse au niveau de l'indice (R99p) et (R95p) est très significative (P-value < 0,001). Cette situation prédispose le bassin à des évènements pluviaux intenses et extrêmement rares et montre par la même occasion le degré de vulnérabilité du bassin face aux catastrophes climatique.

Références

- [1] - J-M. MOISSELIN et B. DUBUISSON, Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XXe siècle en France, *La Météorologie*, N° 54 (août 2006) 10 p.
- [2] - MASLIN et MARK " *Le changement climatique* " Ed. Diffusion Presse Sciences, Les Ulis France, (2022) 11 - 14
- [3] - A. M. KOUASSI, K. F. KOUAME, K. B. YAO, K. B. DJE, PATUREL et J. E. S. OULARE, Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergéo)*, (2010) [Online]. Available : <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.23388.html> [Accessed 1 Décembre 2022]
- [4] - Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GEIEC), "Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité Afrique", (2001)
- [5] - Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GEIEC), "Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Résumé à l'intention des décideurs", (2007) [Online]. Available: http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/wg2/ar4-wg2_spmfr.pdf
- [6] - Société Canadienne de surveillance maritime et de gestion des catastrophes (RADARSAT), Inondation en Afrique de l'Ouest / Nigeria (Lokodja), *Chater Activations*, (2012) [Online]. Available : <http://www.disasterchater.org> [Accessed 1 Décembre 2022]
- [7] - Rapport d'Evaluation des Besoins Post Catastrophe (REBPC), " *Inondations de 2019 au Bénin* ", Ed. Agence Nationale de Protection Civile, Bénin, (Aout 2020) 109 p.
- [8] - K. S. ADAM et M. BOKO, " *Le Bénin* ", Ed. Du Flamboyant, Cotonou 2è- édition, (1993)
- [9] - E. ATIYE, " Caractérisation des risques hydro-climatiques dans le bassin versant béninois du fleuve mono à l'exutoire d'Athiémé ", Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey—Calavi, Benin, (2017) 255 p.
- [10] - E. AMOUSSOU, P. CAMBERLIN, S. H. T. VODOUNON, Y. TRAMBLAY, C. HOUNDENOU, G. MAHÉ, J. E. PATUREL, M. BOKO, Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité / changement climatique, XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie 2-5 juillet 2014- Dijon (France), (2014) 342 - 348
- [11] - E. E. AGO, F. PETIT et P. OZER, Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin), *Geo-Eco-Trop*, 29 (2005) 1 - 14
- [12] - Rapport d'Evaluation des Besoins Post Catastrophe (REBPC), " *Inondations au Bénin* ", Ed. Agence Nationale de Protection Civile, Bénin, (2011)

- [13] - E. AMOUSSOU, " Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvial lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)", Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, (2010) 313 p.
- [14] - GUEDESSOU, Changements climatiques et évaluation environnementale-enjeux et outils pour l'évaluation des impacts et l'élaboration de plans d'adaptation : enjeux des changements climatiques dans la mise en œuvre du projet d'aménagement hydroagricole de la basse vallée du fleuve mono, 14è colloque international de l'IEPF et du SIFEE 28 mai 2009- Niamey (Niger), (2009) 1 - 28
- [15] - S. K. KLASSOU, N. S. A. AKIBODE, E. KOZOLINE, K. KOKOU et K. SOKEMAWU, Fleuve mono et vulnérabilité des communautés riveraines en aval du barrage hydroélectrique de Nangbeto, *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 9 (12) (2020) 306 - 336
- [16] - D. R. EASTERLING, L. V. ALEXANDER, A. MOKSSIT & V. DETERMMERMEN, CCI/CLIVAR workshop to develop priority climate indice, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84 (10) (2003) 1403 - 1407
- [17] - A. M. C. AHOSSI, A. ALASSANE, E. W. VISSIN, A. ZONGO, P DOSSOU, Identification de la Zone de Recharge de l'Aquifère du Crétacé Supérieur dans le Bassin Versant du Mono à l'Exutoire de Athiémé, *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 19 (1) (2020) 122 - 130
- [18] - A. A. ASSANI, Variabilité temporelle et persistance des épisodes secs en saison des pluies à Lubumbashi (Congo - Kinshasa), *Note méthodologie, Sécheresse*, 10 (1) (1999) 45 - 53
- [19] - T. D. SORO, N. SORO, Y. M. S. OGA, T. LASM, G. SORO, K. E. AHOUSI et J. BIENI, Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (sud-ouest de la Coté d'Ivoire), *Physio-Géo*, Vol. 5, (2011) 55 - 73, <http://journals.openedition.org/physico-geo/1581>
- [20] - E. A. ALAMOU, G. M. L. D. QUENUM, E. A. LAWIN, D. F. BADOU et A. A. AFOUDA, Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin, *Afrique Science*, 12 (3) (2016) 315 - 328, <http://afriquescience.info>
- [21] - P. HUBERT, J. P. CARBONEL & A. CHAUCHE, Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest, *Journal of Hydrology*, 110 (1989) 349 - 367
- [22] - S. A. BADARA et M. CAMARA, Evolution Des Indices Pluviométriques Extrêmes Par L'analyse De Modèles Climatiques Régionaux Du Programme CORDEX : Les Projections Climatiques Sur Le Sénégal, *European Scientific Journal*, édition, Vol. 13, N° 17 (June 2017) ISSN : 1857 - 7881 (Print) e - ISSN 1857 - 7431
- [23] - P. OZER, O. L. MANZO, A. D. TIDJANI, B. DJABY & F. DE LONGUEVILLE, Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950 - 2014) Recent evolution of rainfall extremes in Niger (1950 - 2014), *Geo-Eco-Trop.*, 41 (3) (2017) 375 - 383
- [24] - P. OZER, Y. C. HOUNTONDI & O. LAMINOU MANZO, Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007, *Geo-Eco-Trop.*, 33 (2009) 11 - 30
- [25] - F. DE LONGUEVILLE, Y. C. HOUNTONDI, I. KINDO, F. GEMENNE & P. OZER, Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950 - 2013), *International Journal of Climatology*, 36 (2016) 4393 - 4405
- [26] - A. T. HALIMATOU, T. KALIFA & N. KYEI-BAFFOUR, Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961-2014, *Weather and Climate Extremes*, 18 (2017) 8 - 16
- [27] - S. B. OGUNGBENRO & T. E. MORAKINYO, Rainfall distribution and change detection across climatic zones in Nigeria, *Weather and Climate Extremes*, 5 (2014) 1 - 6
- [28] - P. OZER, P. HOUNTONDI, Y. C. GASSANI, J. DJABY et B. F. DE LONGUEVILLE, évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010), XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 2-5 juillet 2014 - Dijon (France), (2014) 394 - 400

- [29] - E. AGUILAR, A. AZIZ BARRY, M. BRUNET, L. EKANG, A. FERNANDES, M. MASSOUKINA, X. ZHANG, Change in temperature and precipitation extremes in wewtern central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955-2006, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114 (D02115), doi :1029/2008JD011010
- [30] - H. YAROU, E. OBADA, E. I. BIAO, D. F. BADOU et E. A. ALAMOU, Variabilité des extrêmes pluviométriques récents dans le bassin béninois du fleuve Niger (1960 - 2016), BÉNIN, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 34 (2019) 112 - 126, ISSN 1813 - 3290, <http://www.revist.ci>
- [31] - E. OBADA, "Approche de quantification des changements récents et futurs de quelques paramètres hydro-climatiques dans le bassin de la Mékrou (Bénin)", Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, (2017) 212 p.
- [32] - P. TULLEN, A. PARRIAUX, P. TURBERG et C. M. MARCUARD, Extreme climate event triggering landslide : example in the vaudoises Alps, Switzerland, *Rev. Fr. Géotech.*, N°95 - 96 (2001) 7 - 14
- [33] - GIEC, Changements climatiques, "Rapport de synthèse", (2007b)
- [34] - E. AMOUSSOU, S. H. TOTIN VODOUNON, A. HOUGNI, E.W. VISSIN, C. HOUNDENOU, G. MAHE et M. BOKO, Changements environnementaux et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin-versant Béninois de fleuve Niger, *International Journal of Biological and Chemical Science*, 10 (5) (2016) 2183 - 2201
- [35] - S. ZEROUAL, " Etude des précipitations extrêmes dans le contexte de changement climatique : Cas du bassin versant de Hodna ", Thèse unique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Algérie, (2022) 153 p.