

Research Article

DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE ET SON INFLUENCE SUR LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DANS LE BASSIN DU MONO AU BENIN

¹AdjhaEdid AMOUZOUNVI, ²Lucien AGBANDJI, ¹*Pierre OUASSA, ¹Expédit Wilfrid VISSIN

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin.

²Laboratoire d'Anthropologie et de Sociologie, de la Dynamique Environnementale, Éducationnelle, du Rural et du Genre (LASDEERG) FASHS, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

Received 20th September 2024; Accepted 21th October 2024; Published online 30th November 2024

RÉSUMÉ

Les variations hydroclimatiques et les impacts sur les principales composantes environnementales constituent l'un des plus grands défis auxquels l'humanité fait face au cours du XXI^{ème} siècle. Cette recherche vise à analyser l'influence de la dynamique hydroclimatique sur les ressources en eau de surface du bassin du Mono au Bénin. L'approche méthodologique utilisée a consisté en la collecte et au traitement des données pluviométrique et hydrologique sur la période allant de 1960 à 2021. Ces différentes données après traitement à partir des méthodes des statistiques descriptives (moyenne arithmétique, indices centrés réduits, test de Pettit). L'analyse des indices pluviométriques et du bilan hydrologique a permis de mettre en évidence l'influence de la dynamique hydroclimatique sur les ressources en eau de surface. Les résultats obtenus montrent qu'entre 1960 et 2021, les hauteurs de pluies et les débits des cours d'eau ont connu des variations dans le bassin versant de de mono au Bénin. Il ressort que la période avant les années 1970 a été globalement plus humide par rapport aux décennies des années 1980 et qu'à partir des années 1990, on note une légère augmentation des hauteurs de la lame d'eau écoulée. Les manifestations des variations climatiques perçues par les populations du bassin du Mono au Bénin sont entre autres les inondations (88,63%); les poches de sécheresse (52,33%); la chaleur excessive (48,21%); le dérèglement des saisons pluvieuses avec les pluies qui surviennent de plus en plus tardivement et de façon violentes (39,88%). Les conséquences majeures de ce phénomène demeurent l'assèchement des cours et plans d'eau (65,42%), le tarissement des forages et puits traditionnels (20,32%), le débordement des cours d'eau en période de pluie (14,11%), l'attroupement aussi bien des populations que des animaux autour des points d'eau (9,88%).

Mots-clés: bassin du Mono, risque hydroclimatique, impact, ressource en eau, manifestation.

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique global, la question des variations climatiques et en particulier du cycle hydrologique sont cruciales à l'échelle planétaire (M. Sall, 2015 p. 83). Ce phénomène impactent les zones humides, qui à l'échelle mondiale, constituent des milieux de grandes productions des services éco-systémiques pour l'humanité.

Au cours des dernières décennies, les perturbations climatiques ont influé sur les systèmes naturels et humains de tous les continents et sur tous les océans. Les preuves les plus flagrantes et les mieux étayées des incidences du changement climatique ont trait aux systèmes naturels (GIEC, 2014, p.4). Dans beaucoup de régions, les pressions qui pèsent sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines, notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie, la concurrence croissante pour les ressources en eau et la pollution (L. Gouaidia, 2008, p. 69).

Dans ce contexte global, les études portant sur la variabilité et les changements climatiques ont intéressé la communauté mondiale suite à plusieurs manifestations climatiques de grande ampleur et l'on note parmi celles-ci la sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète (surtout les pays sahéliens d'Afrique de l'Ouest) depuis les années 1970 (J. Sircoulon, 1990, p. 6). Cette variation climatique se traduit sur le continent africain par une

sécheresse qui sévit depuis une trentaine d'années dans les pays sahéliens et qui connaît une extension vers les pays humides en bordure du Golfe de Guinée. Cette sécheresse a pour conséquence de graves baisses des précipitations, des niveaux piézométriques et la chute des débits des cours d'eau (M. Sall, 2015 p. 86). Plusieurs études et analyses ont montré que l'Afrique de l'Ouest notamment la bande sahélienne a enregistré une forte variabilité du régime pluviométrique au cours de la seconde moitié du vingtième siècle (B. Ibrahim, 2012, p.4).

Au Bénin, les climats sont caractérisés par une très forte irrégularité et une très mauvaise répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace (E. Amoussou, 2010, p. 173). Cette situation se traduit par une modification du régime pluviométrique et du rythme des précipitations (fréquence et intensité), affectant directement l'importance et la synchronisation de l'écoulement; de l'intensité des crues ; des inondations et des sécheresses (E. W. Vissin, 2007, p. 31; E. Amoussou, 2010, p. 45).

Autant les variations hydroclimatiques de l'époque contemporaine perturbent le bon déroulement des activités socio-économiques, autant elles représentent des facteurs de risques qui fragilisent la santé des populations (GIEC, 2014, p.6). Du reste, la persistance de la sécheresse au cours des dernières décennies et l'amenuisement continu des ressources en eau impliquent la nécessité d'une intégration des données hydroclimatiques dans la planification du développement durable (E. W. Vissin, 2011, p.4). Dans le bassin du Mono tout comme partout ailleurs au Bénin, la variabilité climatique associée à la croissance démographique et aux progrès économiques constitue aujourd'hui les facteurs de vulnérabilité des ressources naturelles. La pression démographique liée aux activités

*Corresponding Author: Pierre OUASSA,

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin.

économiques dans les plaines d'inondation, sur les bassins-versants comme l'édification de bâtiments, d'infrastructures, de barrage et des champs, multiplie les risques de crues (OMM, 1992). Selon E. Amoussou (2014, p.26) et M. F. Ahéhinnou Yedo (2020, p.169), dans de nombreux cas, les plaines d'inondation et/ou bassins-versants offrent d'excellentes opportunités techniques et économiques de gagner sa vie facilement comme c'est le cas dans les basses vallées du Mono et de l'Ouémé au Bénin. Cette recherche vise donc à analyser l'influence de la dynamique hydroclimatique sur les ressources en eau de surface du bassin du Mono au Bénin.

SECTEUR D'ÉTUDE

Le bassin-versant du Mono, situé dans la région du golfe de Guinée est partagé entre le Bénin et le Togo. Les parties hautes et moyennes du bassin sont en grande partie sur le territoire togolais. Il s'étend entre 06°16' et 09°20'N et 0°42' et 2°25'E et il couvre une superficie de 27 870 km². La portion béninoise objet de cette recherche couvre une superficie de 2267 km². La figure 1 présente la situation géographique de la portion béninoise du bassin versant du Mono.

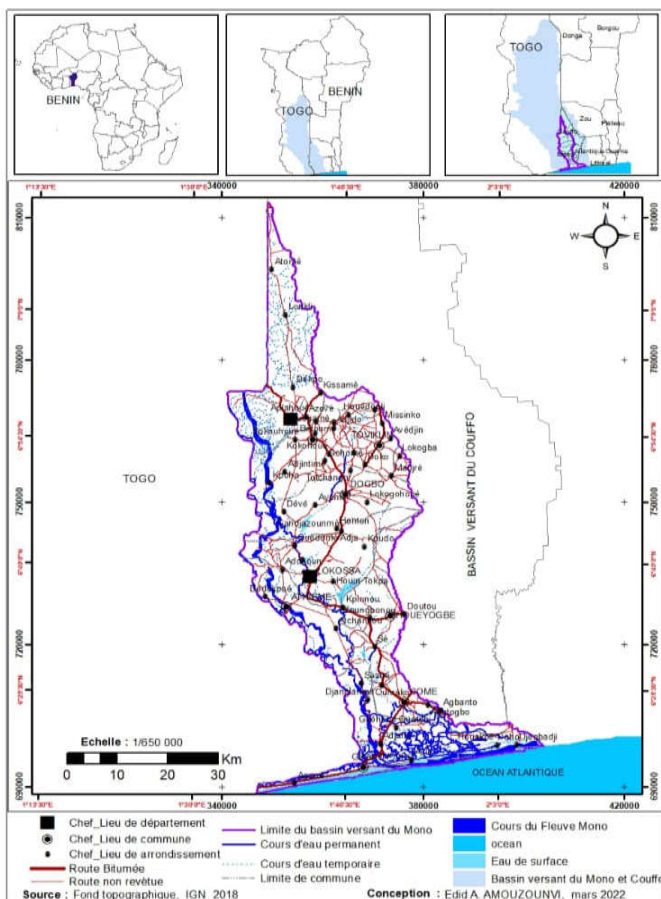


Figure 1 : Situation géographique de la portion béninoise du bassin versant du Mono au Bénin

DONNÉES ET MÉTHODES

Données utilisées

Les données utilisées pour atteindre cet objectif sont de plusieurs ordres:

Données climatiques: il s'agit des hauteurs de pluies (journalières, mensuelles) réparties dans le bassin du Mono au Bénin, des températures maximales et minimales et de l'ETP sur la période 1960-2021, qui ont été extraites des fichiers des stations et

postes climatologique de la Direction Nationale de la Météorologie (DNM);

Données hydrométriques: les données hydrologiques (débits journaliers et mensuels) du fleuve Mono sur la période 1960-2021 sont tirées des données hydrométriques du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau à Cotonou ;

Données socioéconomiques: Il s'agit des données issues des entretiens avec les populations et les personnes ressources du secteur d'étude. Les investigations socio-anthropologiques ont permis d'appréhender les perceptions des populations sur les variations hydroclimatiques et leurs influences sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin du Mono au Bénin.

Méthodes utilisées

Travaux de terrain

Les enquêtes de terrain ont été réalisées dans le secteur d'étude. Vingt et un (21) villages/quartiers de ville des quatre Communes (Athiémé, Bopa, Grand-Popo et Lokossa) ont été parcourus, choisis en fonction de leur proximité. L'identification des personnes interviewées a été faite comme suit : dans le village/quartier de ville ciblée, la personne interrogée est choisie dans le premier ménage situé à côté de celui du chef de village/quartier de ville.

Le choix des cibles interrogées a été également fondé sur un choix raisonné :

- les personnes ressources (notables, les agents des services des eaux et assainissement, les ONG, les responsables de protection des ressources en eau au niveau de chaque Commune) ont été priorisées en raison de leur savoir sur le climat et la gestion des ressources en eau ;
- les populations ont été interrogées en raison de ce qu'elles pratiquent au moins une activité agricole et sont capables de fournir des informations sur le climat et les stratégies d'adaptation aux effets des variations hydroclimatiques.

La taille de l'échantillon a été déterminée par la méthode probabiliste de Schwartz (2002) présentée par l'équation 1.

$$X = (Z_{\alpha})^2 \times p(1 - p) / i^2 \tag{1}$$

Avec : X = la Taille de l'échantillon ; Z_{α} = écart réduit correspondant à un taux de sondage 95 % ($Z_{\alpha} = 1,96$) ; $p = n/N$; avec P = nombre de ménages du village ou quartier de ville choisis/nombre ménages des villages choisis dans quatre (04) communes du secteur de recherche (Athiémé, Bopa, Grand-Popo et Lokossa). Au total 394 personnes ont été individuellement interrogées dans 21 localités du bassin du Mono au Bénin. En effet, les personnes interrogées ont au moins dix-huit (18) ans et soixante (60) ans au plus car ceux-là sont à même de fournir des renseignements exacts sur les questions qui leur sont posées. Les groupes cibles sont constitués des personnes âgées, sages et notables, des personnes ressources impliquées dans la gestion des infrastructures hydrauliques et des ressources en eau de la zone de recherche (techniciens et ingénieurs de la DG-Eau, de la Direction Départementale de l'Eau du Mono, les ONG intervenant dans le domaine, les fermiers et les fontainiers).

Méthodes d'analyse de la variabilité hydroclimatique et ses implications actuelles sur les ressources en eau de surfaces dans le bassin du Mono au Bénin

❖ Moyennes arithmétiques des données hydroclimatiques

La moyenne arithmétique est l'outil statistique le plus fréquemment utilisé dans les études de climatologie (C. Houndénou, 1999). Dans

cette étude, elle a été calculée sur une série de 59 ans, et elle demeure représentative du climat sur une longue période. Les totaux pluviométriques permettent d'étudier les quantités de pluies et leurs rythmes. Ils sont calculés par la méthode du simple cumul : $n_1+n_2+...+n_{12}$. avec n_i = valeurs journalières et mensuelles. Paramètre de tendance centrale, la moyenne arithmétique X est utilisée pour étudier les régimes pluviométriques sur une période de 59 ans.

❖ **Etude des tendances hydroclimatiques**

Il s'agit de déterminer par la méthode de régression les tendances thermométriques, pluviométriques de 1961-2018 et hydrologiques de 1961-2020. Elle consiste en une représentation graphique de droite de régression de type affine qui présente l'évolution linéaire et permet de déceler la tendance. L'équation de la droite de tendance est sous la forme : $y = at + b$; a est le coefficient directeur et représente la pente et b une constante, telles que :

$$a = \frac{(\sum y)(\sum t^2) - (\sum t)(\sum ty)}{N\sum t^2 - (\sum t)^2} \quad b = \frac{N(\sum yt) - (\sum t)(\sum y)}{N\sum t^2 - (\sum t)^2}$$

Ainsi :

Si $a > 0$, on a une tendance à la hausse ;

Si $a < 0$, on a une tendance à la baisse

Aussi, la longue série climatologique (1961-2020) a été divisée en deux sous séries, grâce à la méthode non paramétrique de Pettitt cumulé avec le test de segmentation de Buishand, réalisé avec le logiciel Khronostat 1.01. La mise en évidence de l'indice pluviométrique a permis de caractériser les anomalies et d'identifier les périodes de crues et d'étiages dans le bassin du Mono au Bénin.

❖ **Détection de rupture de stationnarité dans le bassin du Mono au Bénin**

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de détection de ruptures des séries chronologiques (test de Pettitt, statistique de Buishand, segmentation de Hubert).

Le test de Pettitt a permis de détecter les « ruptures » dans les séries pluviométriques. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population. Ce test repose sur le calcul de la variable U_t , N définie par :

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

Où $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$; 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$.

Soit KN 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 KN prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est donnée approximativement par :

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

Pour un risque α de première espèce donnée, si $\text{Prob}(K_n > K)$ est inférieure à α l'hypothèse nulle est rejetée. Ce test est réputé pour sa robustesse ainsi que leur utilisation courante dans de nombreux travaux (E. W. Vissin, 2007, p. 86 ; G. A. A. Atchadé, 2014, p. 60 ; D. H. Koumassi, 2014, p. 72 ; O. Koudamilo, 2017, p. 58).

❖ **Détermination des indices standardisés de précipitations et de débits**

L'indice standardisé de précipitation est plus utilisé pour l'analyse de la sécheresse mais il peut l'être aussi pour les inondations. Pour les aléas de débits, c'est l'indice SFI (Standardized Flow Index) de même formule que SPI qui sera utilisé. Ces indices standardisés sont calculés sur la base des pluies mensuelles pour des échelles de temps multiple. A l'origine, T. McKee *et al.*, (1993), proposent pour le calcul de l'indice SPI une transformation Gamma. Cet indice sera utilisé aux pas de temps mensuels ou pluri-mensuels. Mais, pour cette recherche, l'indice standardisé classique (noté SPI) sera utilisé avec un changement de pas de temps à l'échelle journalière. A l'aide des données de précipitations et de débit, il est calculé par la formule : $\text{SPI} = (p_i - p_m)/\sigma$

Où SPI est indice standardisé des précipitations, p_i est la précipitation de l'année i , p_m est la précipitation moyenne et σ est la déviation standard ou l'écart type. Cet indice permet de déterminer le degré d'humidité ou de sécheresse du milieu.

❖ **Détection des seuils pluviométrique et hydrologique de risque hydroclimatiques**

Une corrélation est établie entre les débits et les pluies dans chacune des stations pluviométriques en considérant le débit de la période de hautes eaux et les précipitations de la période humide.

En utilisant les seuils de sévérité établis par la méthode de nombre d'écart type, A. Aghrab (2003) a établi une classification de SPI (tableau I).

Tableau I : Classification de la sévérité de la sécheresse

Classification Selon SPI	Seuils des classes de sévérité
Extrêmement humide	Plus de 2,0
Sévèrement humide	1,5 à 1,99
Modérément humide	1,0 à 1,49
Normale	-0,99 à 0,99
Modérément sèche	-0,8 à -1,2
Sévèrement sèche	-1,3 à -1,5
Extrêmement sèche	-1,6 à -1,9
Exceptionnellement sèche	-2,0 et plus

Source : Aghrab (2003)

Ces différents indices sont utilisés pour déterminer la variation hydro pluviométrique et spécifiquement, les années marquées par un excédent ou un déficit pluviométrique dans le bassin.

❖ **Etude du bilan hydrologique**

Il est indispensable pour évaluer l'influence des variations hydro-pluviométriques sur les autres termes du bilan et aussi pour mettre en

évidence la relation existant entre la sécheresse pluviométrique observée depuis 1970 et la sécheresse hydrologique de ces trois dernières décennies.

L'équation du bilan hydrologique (E. W. Vissin, 2007, p. 86) au cours d'une période peut s'écrire de la manière suivante :

$$P = E + L + I + (S1 - S0) \text{ avec : } P = \text{pluie, en mm}$$

E = évapotranspiration, en mm

L = écoulement, en mm

I = recharge (infiltration), en mm

$S1 - S0$ = variation du stock d'eau présent dans le bassin, en mm

Des cinq termes de cette équation, deux (I et $S1 - S0$) ne sont pas quantifiables par des mesures directes. $S1 - S0 = 0$; en prenant l'année hydrologique de sorte que le début et la fin coïncide avec la période de la forte saison sèche.

• Estimation de l'infiltration (I)

La méthode d'estimation de l'infiltration adoptée dans la présente étude représente le solde du bilan hydrologique. Les autres termes du bilan sont eux-mêmes connus avec une certaine imprécision (E. W. Vissin, 2007, p. 86). Cette imprécision se répercute sur l'infiltration estimée. Du fait de ces incertitudes, la recharge de la nappe n'est pas assimilée directement. Néanmoins, l'analyse de ce paramètre peut reconstituer l'évolution de la recharge sur le bassin. Il est exprimé par la formule suivante : $I = P - (L + E)$. Avec : I : infiltration en mm ; P : pluie en mm ; L : écoulement en mm ; E : évaporation en mm.

• Estimation de l'évapotranspiration réelle (E)

L'évaporation a été estimée en se basant sur les mesures indirectes à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'évaporation d'une surface peut être écrite par l'équation suivante : $E = \alpha \cdot ETP$

La première étape consiste à obtenir les valeurs de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP). La meilleure estimation de l'ETP est donnée par la formule de Penman (qui utilise plusieurs paramètres climatologiques : pression atmosphérique, tension de vapeur, radiation, insolation, rayonnement global...). L'ETP est, par définition, l'évaporation maximale que pourrait fournir un couvert végétal (gazon) suffisamment irrigué pour satisfaire la demande en eau de l'atmosphère.

Il convient ensuite de calculer l'évapotranspiration (E). Le coefficient qui traduit la disponibilité en eau dans les premiers horizons du sol est toujours inférieur ou égal à 1. Pour l'exprimer, il faut connaître à la fois le stock d'eau présent dans le sol et les résistances opposées par le système sol/végétation à l'évaporation. Ainsi, il a été adopté pour cette étude, la même hypothèse que Sutcliffe et Piper, (1986), à savoir :

si $P > ETP$, alors, où P_i = pluie mensuelle en mm ;

si $P < ETP$, alors $\alpha = \frac{P_i}{ETP_i}$ où ETP_i = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm

La méthode utilisée est très approximative lorsqu'elle s'applique à l'échelle mensuelle.

Toutefois, à l'échelle annuelle, il y a compensation entre les erreurs de début et de fin de saisons des pluies, qui résultent respectivement d'une surestimation (quand se reconstituent les réserves en eau du sol et que la végétation reprend) et d'une sous-estimation (à cause du prélèvement opéré dans les réserves d'eau dans le sol) de l'ETR.

❖ Détermination de l'écoulement et variation du déficit et du coefficient d'écoulement

Écoulement : Le terme d'écoulement se rapporte toujours à la circulation gravitaire de l'eau ; il prend plusieurs aspects selon la profondeur à laquelle il se situe dans le sol. En hydrologie de surface, le terme d'écoulement concerne exclusivement la circulation de l'eau dans le réseau hydrographique. Il s'agit d'un phénomène qui peut se quantifier par des mesures directes de débits. Sa formule est :

$$L = \frac{Q}{S} \times t \times 10^3$$

Avec L = écoulement (mm) ; Q = débit (m^3/s) ; t = le temps ; S = superficie du bassin (km^2)

Déficit d'écoulement (DE) : Le déficit d'écoulement représente la différence entre les précipitations (P) tombées sur le bassin-versant et le volume d'eau ($\int Qdt$) écoulée à l'exutoire :

$$DE = P - \int Qdt$$

Il se traduit aussi comme la quantité d'eau de pluie ayant échappé à l'écoulement de surface. Cette valeur, caractéristique du milieu d'étude, varie assez peu dans le temps. Elle est théoriquement égale à l'évaporation à la surface du bassin-versant. Sa détermination dans le cadre de cette étude a permis d'apprécier les risques hydroclimatiques par rapport à la lame d'eau écoulée dans le bassin du Mono au Bénin.

Coefficient d'écoulement : Il a été déterminé à partir de la formule ci-après

$$C = \frac{L}{P} \times 100$$

Avec L = écoulement (mm) et P = hauteur de pluie (mm).

Il traduit le ruissellement du bassin. Ce coefficient est étroitement lié à des variations climatiques et traduit également la relation entre les pluies et les écoulements (G. Mahé et Olivry, 1995). Il permet aussi d'analyser le rôle joué par le substratum géologique du bassin considéré.

La comparaison des sous périodes pluvio-hydrologiques a permis d'évaluer les risques hydroclimatiques dans le bassin du Mono au Bénin.

❖ Comparaison des déficits entre deux sous-périodes différentes

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

$$Def = \frac{\bar{X}_2 - \bar{X}_1}{\bar{X}_1} \times 100$$

Avec : \bar{X}_1 , la moyenne de la première sous-période en un temps

t_1 ; \bar{X}_2 , la moyenne de la seconde sous-période en un temps t_2 .

En plus de ces paramètres, s'ajoute le calcul du débit écologique pour analyser le niveau de l'eau au cours des extrêmes climatiques et d'apprécier son incidence sur l'écosystème dans le secteur d'étude.

❖ Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame d'eau écoulée

Le coefficient de corrélation linéaire a été utilisé pour mesurer le degré de liaison ou de dépendance qui existe entre les lames précipitées et les lames écoulées dans le dans le bassin du Mono au Bénin. Il est défini par :

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum (Xi - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sigma(X)\sigma(Y)}$$

Avec : N est le nombre total d'individus ; xi et yi sont les valeurs des séries; et \bar{y} sont les moyennes des variables; $\sigma(x)$ et $\sigma(y)$ représentent leurs écart-type respectifs.

RÉSULTATS

Analyse de la variabilité des séries hydroclimatiques

Variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin du Mono au Bénin

Le traitement et l'analyse des statistiques des données pluviométriques du bassin du Mono au Bénin a permis de dresser le profil de la variation interannuelle de la pluviométrie de 1960 à 2021 (figure 2).

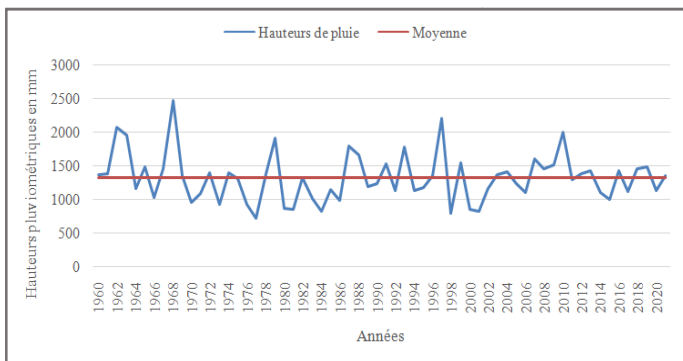


Figure 2 : Evolution des hauteurs de pluie annuelle du bassin du Mono au Bénin

Source : Traitement de données Météo-Bénin, 2022

L'analyse de la figure 2 révèle que le bassin a connu une évolution pluviométrique contrastée. La période 1970-1987 a enregistré des tendances à la baisse des hauteurs de pluies. Par contre, la période 1988-2021 semble décrire une légère hausse des hauteurs de pluies comparativement à la période précédente et celle de 1960-1969. Ceci confirme la forte variabilité pluviométrique interannuelle observée par les producteurs. En effet, l'analyse des hauteurs pluviométriques du bassin, montre qu'il y a une rupture dans les séries pluviométriques étudiées. Ainsi, pour mieux identifier les différentes périodes humides et sèches qu'a connu le bassin du Mono au Bénin au cours de la période 1960-2021, la rupture de stationnarité des épisodes pluvieux ont été déterminés.

Analyse de la rupture de stationnarité dans les chroniques de pluie dans le bassin du Mono au Bénin

La figure 3 présente la rupture de stationnarité dans l'évolution des séries pluviométriques annuelles dans le bassin du Mono au Bénin.

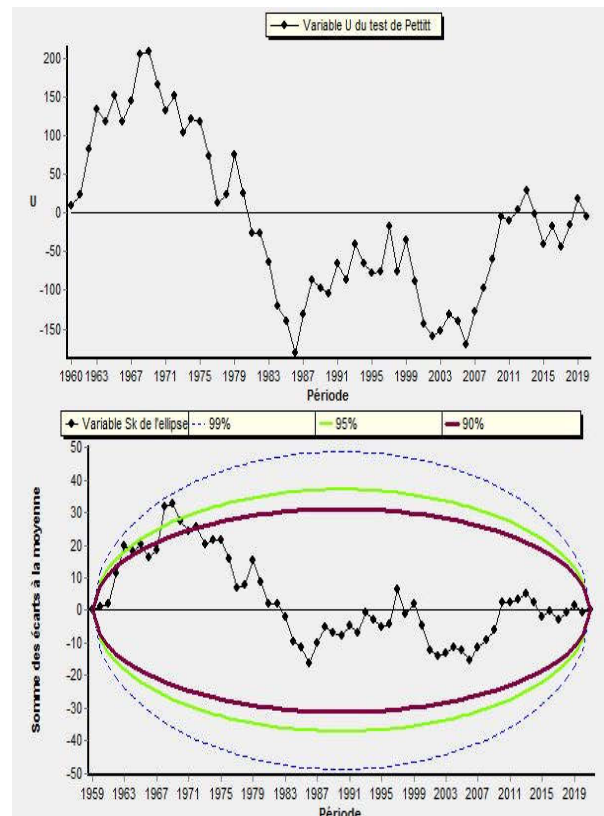


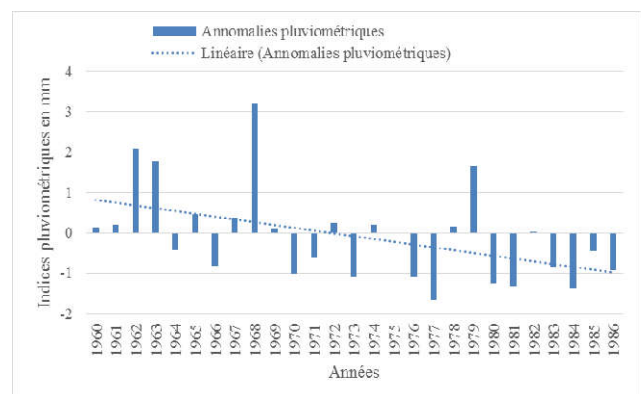
Figure 3 : Rupture de stationnarité par test de Pettitt et de Buishand dans les séries pluviométriques du bassin du Mono au Bénin de 1960 à 2021

Source : Traitement de données Météo-Bénin, 2022

L'analyse de la figure 3, révèle que deux ruptures de stationnarités ont été observées au cours des années 1986 et 2006 dans le champ pluviométrique utilisé dans le bassin avec une significativité de 99 % selon le test de A. N. Pettitt (1979). Il apparaît donc trois grandes sous périodes notamment la période humide de 1960 à 1986, la période de récession pluviométrique de 1987 à 2006 et la période de reprise des hauteurs pluviométriques de 2007 à 2021.

Analyse comparée de l'évolution pluviométrique annuelle par sous-période (1960-1986, 1987-2006 et 2007-2021)

A partir des sous-périodes identifiées, les indices standardisés de précipitation ont été déterminées. Ces indices ont permis de mieux cerner la dynamique pluviométrique dans le bassin (figure 4).



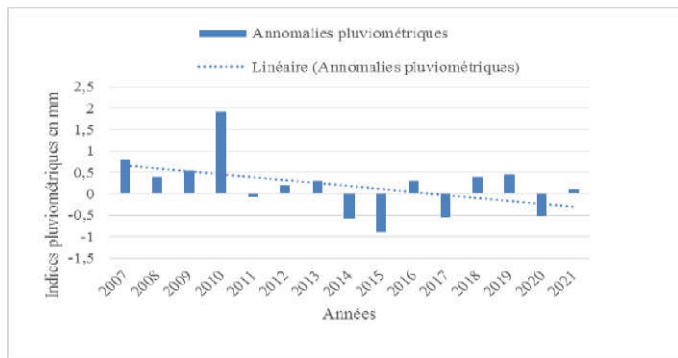
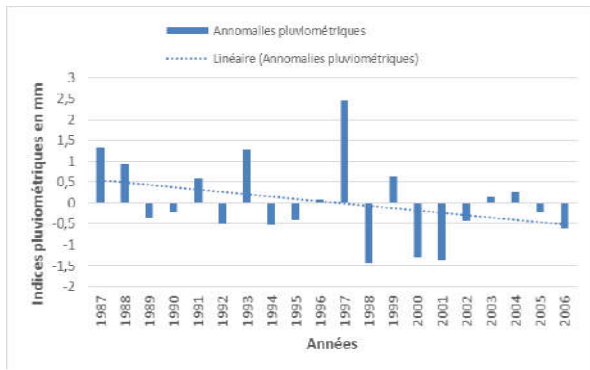


Figure 4 : Indice pluviométrique interannuel de 1960 à 1986, de 1987 à 2006 et de 2007 à 2021

Source : Traitement de données Météo-Bénin, 2022

Il ressort de l'analyse de la figure 4 que, le bassin du Mono est marqué par une forte variabilité pluviométrique qui se présente sous la forme d'une alternance d'années déficitaires, moyennes et excédentaires. En effet, au niveau de la sous période 1960-1986 il y a plus d'années déficitaires que sur la période 1987-2006. Les coefficients de régression sont négatifs sur les deux sous-périodes ce qui justifie la baisse des tendances observées. Cette même variation a été observée au niveau de la sous-période 2007-2021 mais à des degrés moindres par rapport aux sous-périodes de 1960-1986 et 1987-2006. Ce qui témoigne de la reprise plus des hauteurs pluviométriques dans le bassin depuis 2007. De ce fait, cette tendances des indices pluviométriques indiquent que, le bassin du Mono au Bénin évolue progressivement des années déficitaires vers celles excédentaires.

Régimes pluviométriques par sous-période

Les régimes pluviométriques avant et après rupture de stationnarité présentent les mêmes évolutions au pas de temps mensuels et que les hauteurs de pluie de la période avant la rupture ont une tendance à la baisse (figure 5).

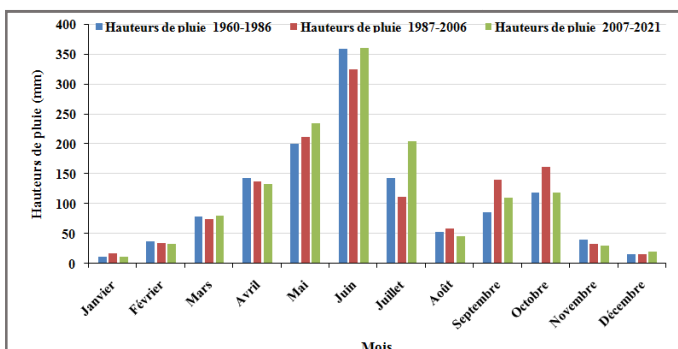


Figure 5 : Variation inter-mensuelle des précipitations par sous-périodes

L'analyse comparée des trois sous-périodes permet de mettre en lumière une variation en dents de scies des hauteurs de pluie saisonnières sur la période 1960-2021 avec un maximum en juin pour la grande saison pluvieuse et en octobre pour la petite saison pluvieuse. Ainsi, il est constaté que la sous-période de 1987 à 2006 semble être la moins arrosée lors de la grande saison des pluies (avril-juillet) que celles observées sur la période de 1960-1986 et 2007-2021. Paradoxalement cette sous-période (1987-2006) est la mieux arrosée au niveau de la petite saison pluvieuse (septembre-octobre). Cette situation est imputable à la mauvaise répartition des pluies observée par 96,88% des populations du bassin.

Variabilité hydrométrique dans le bassin du Mono au Bénin

Variabilité interannuelle de l'écoulement dans le bassin du Mono au Bénin

La figure 6 présente la variation interannuelle de l'écoulement dans le bassin du Mono au Bénin.

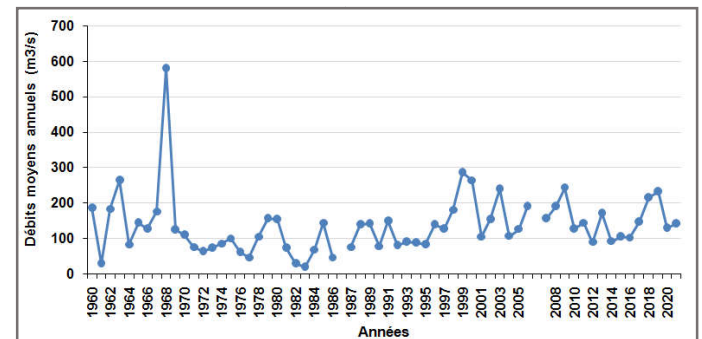


Figure 6 : Variation interannuelle de l'écoulement dans le bassin du Mono au Bénin

Source : DG-Eau et traitement des données, 2023

La figure 6 montre que les débits moyens annuels dans le bassin du Mono au Bénin ont connu une évolution en dents de scies de 1960 à 2021. En effet, de 579,78 m³/s en 1968, ont chuté à 19 m³/s en 1983 puis atteint 286,19 m³/s en 1999. Cette fluctuation est le signe d'une reprise hauteurs pluviométriques et de l'amélioration du système hydrologique et d'une disponibilité des ressources en eau dans le bassin du Mono au Bénin.

Somme toute, il ressort de l'analyse de l'évolution interannuelle des débits moyens que la période avant les années 1970 a été globalement plus humide par rapport aux décennies des années 1980 et qu'à partir des années 1990, on note dans le secteur d'étude une légère augmentation des hauteurs de la lame d'eau écoulee. Ces résultats sont en phases avec les années de rupture observées dans les chroniques de pluies. Il convient donc de dire que la variabilité pluviométrique a réellement eu des répercussions sur la dynamique hydrologique du bassin du Mono au Bénin.

Évolution de la lame d'eau écoulee sur les sous-périodes dans le bassin du Mono au Bénin

La figure 7 présente l'évolution des débits moyens mensuels par sous-période dans le bassin du Mono au Bénin.

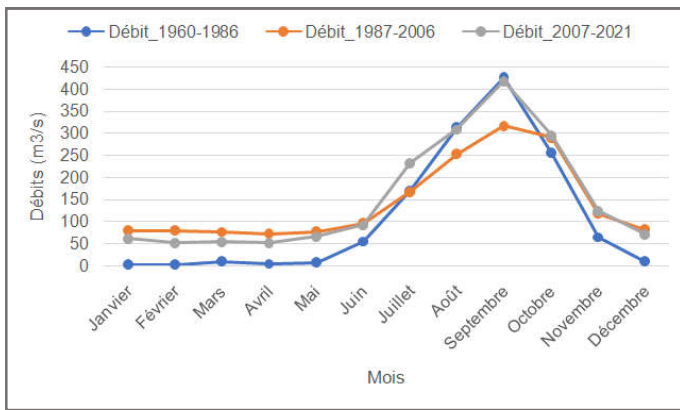


Figure 7 : Variation saisonnière des débits dans le bassin du Mono au Bénin sur les sous-périodes 1960-1986 ; 1987-2006 et 2007-2021

Source : DG-Eau et traitement des données, 2023

Il ressort de l'analyse de la figure 7 que, les écoulements commencent réellement dans le bassin concernent essentiellement les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre. Pour les trois sous-périodes, les mois de juillet, août et septembre enregistrent plus d'écoulement avec un pic en septembre. De ce fait, le mois de septembre apparaît comme celui qui enregistre plus d'écoulement dans le secteur de recherche, notamment au cours des périodes 1960-1986 et 1987-2006 (426,16 et 427,89 m³/s). La sous-période 1987-2006 avec un écoulement de 315,88 m³/s en septembre a connue moins d'écoulement dans le secteur de recherche. Ce résultat est en harmonie avec les analyses de la variabilité pluviométrique présentées dans ce chapitre et confirment que les ruptures de stationnarité de la variabilité pluviométrique ont eu de répercussions sur le régime hydrologique du bassin du Mono au Bénin.

❖ **Détermination du coefficient d'écoulement**

La figure 8 présente l'évolution interannuelle du coefficient d'écoulement du bassin du Mono au Bénin entre 1960 et 2021.

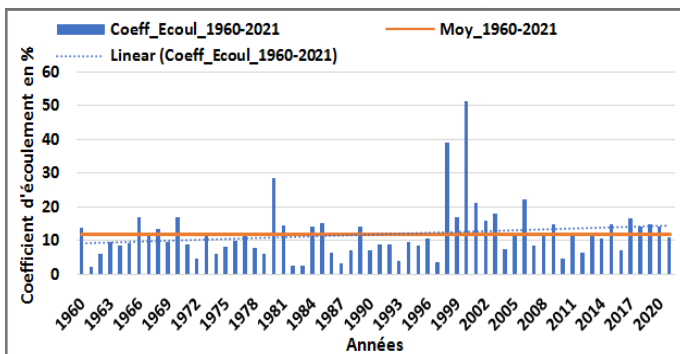


Figure 8 : Variation du coefficient d'écoulement sur la période 1960-2021

Source : DG-Eau et traitement des données, 2023

Il ressort de l'analyse de la figure 8 que, sur la période 1960-221, le coefficient d'écoulement moyen est de 11,85% dans le bassin du Mono au Bénin. Cette valeur traduit l'effet de la variation des lames d'eau précipitées dans le milieu. La légère tendance à la hausse du coefficient d'écoulement dans le bassin du Mono peut se justifier par la forte anthropisation du secteur de recherche du fait de l'augmentation des activités humaines. Pour mieux apprécier l'évolution du coefficient d'écoulement, une analyse a été faites par sous période (figure 9).



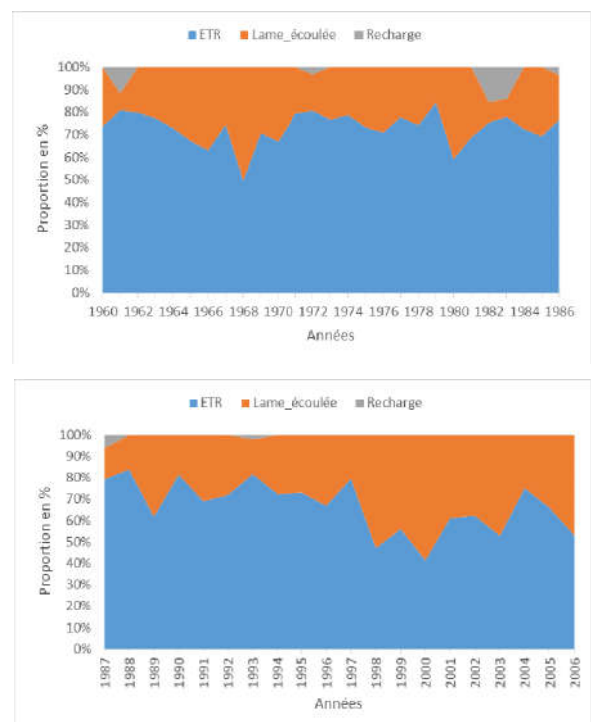
Figure 9 : Evolution des moyennes interannuelles du coefficient d'écoulement par sous période (1960-1986; 1986-2006 et 2007-2021)

Source : DG-Eau et traitement des données, 2023

De l'analyse de la figure 9, il ressort que le coefficient d'écoulement moyen est de 10,19% entre 1960 et 1986 ; 14,36% entre 2006 et 2016 et 16,87% sur la sous période de 2007 à 2021 dans le bassin. Cette augmentation du coefficient d'écoulement au niveau de la sous période allant de 2007 à 2021, traduit une reprise à la hausse des précipitations après la récession de la décennie 1970.

Incidence des variations pluviométriques sur les termes du bilan dans le bassin du Mono au Bénin

La figure 10 présente la variabilité interannuelle des termes du bilan hydrologique dans le bassin du Mono au Bénin.



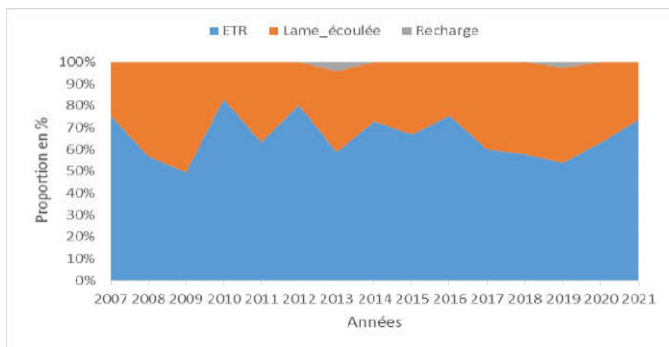


Figure 10 : Variation des termes du bilan hydrologique par sous-périodes dans le bassin du Mono au Bénin de 1960 à 2021

Source : Traitement de données, 2023

Il ressort après analyse de la figure 10 que la pluie est l'élément fondamental qui conditionne les autres paramètres du bilan hydrologique. Ainsi des pluies moyennes de 1322,30 mm ont entraîné un écoulement moyen de 243 mm, des infiltrations moyennes de 322 mm et une évapotranspiration de 657 mm. Il s'ensuit donc que pour 100% de pluie dans le bassin, 49,70% sont destinées à l'évapotranspiration, 18,38% à l'écoulement et 24,35% à l'infiltration. Le taux d'évaporation est donc très élevé sur l'ensemble du bassin. Il est à remarquer que la période de récession pluviométrique (1987-2006) enregistre moins d'évaporation, et d'écoulement que la période de retour des hauteurs de pluies (2007-2021) sur le bassin. Le tableau II présente la proportion de chaque terme du bilan hydrologique.

Tableau II : Proportion de chaque terme du bilan hydrologique pour 100 % de pluie par sous période dans le bassin du Mono au Bénin

	Pluie	ETR (%)	Écoulement (%)	Infiltration (%)
1960-1986	100	68	19	13
1987-2006	100	79	8	16
2007-2021	100	72	20	8
Moyenne	100	73	15,67	12,33

Source : Traitement de données, 2020

Le tableau II présente les impacts des variations pluviométriques sur les autres termes du bilan hydrologique. Il illustre que, pour une hauteur de pluie de 100% reçue dans le bassin du Mono au Bénin, en moyenne 73% sont évaporées. Aussi, 15,67% constituent l'écoulement et 12,33% représentent la recharge. La sous-période 1987-2006 est celle qui a connue moins d'écoulement avec 8% des totaux pluviométriques contre 20% pour la sous-période 2007-2021. Cette dernière sous-période semble cependant enregistrer les plus faibles recharges de la nappe phréatique avec 8% des hauteurs pluviométriques. En somme, dans le bassin du Mono au Bénin, la plus faible part revient à l'infiltration tandis que la plus importante part est attribuée à l'évaporation à travers d'énormes pertes. Le tableau III présente l'évolution comparée du déficit d'écoulement entre les sous-périodes du bassin du Mono au Bénin.

Tableau III : Evolution comparée du déficit d'écoulement entre les sous-périodes du bassin du Mono au Bénin.

	Pluie	Écoulement	Déficit d'écoulement	Proportion (%)
1960-1986	1286,42	244,34	1042,08	-81
1987-2006	1324,42	162,78	1161,64	-87
2007-2021	1384,03	276,80	1107,23	-80
Moyenne	1322,30	243	1079,3	-81

Source : DG-Eau, et traitement des données, 2023

De l'analyse du tableau III, le déficit d'écoulement dans le bassin est de l'ordre de - 81% pour une hauteur pluviométrique moyenne de 1322,30 mm. La sous-période 1987-2006 connaît plus de déficit d'écoulement avec un déficit de - 87% contre - 80% pour la sous-période 2007-2021. Ce déficit d'écoulement a sans aucun doute des répercussions importantes sur la recharge du bassin et peut donc compromettre la disponibilité en eau dans le secteur de recherche.

Perceptions endogènes des manifestations de la variabilité climatique

Les producteurs dans le bassin Mono, portent une attention particulière à la variabilité climatique de même qu'à ses manifestations et conséquences sur les modes et moyens d'existence des populations. En effet, les catégories socio-professionnelles rencontrées ont une bonne perception des indicateurs de l'évolution des paramètres climatiques dans leur milieu de vie.

Principaux indicateurs des manifestations de la variabilité hydroclimatiques dans le bassin du Mono au Bénin

Les résultats de l'analyse des données collectées font ressortir que les populations reconnaissent depuis quatre décennies (période équivalente au début des années 70) les changements intervenus dans le régime des précipitations et des températures. La figure 11 traduit les différentes manifestations des variations climatiques dans le secteur d'étude.

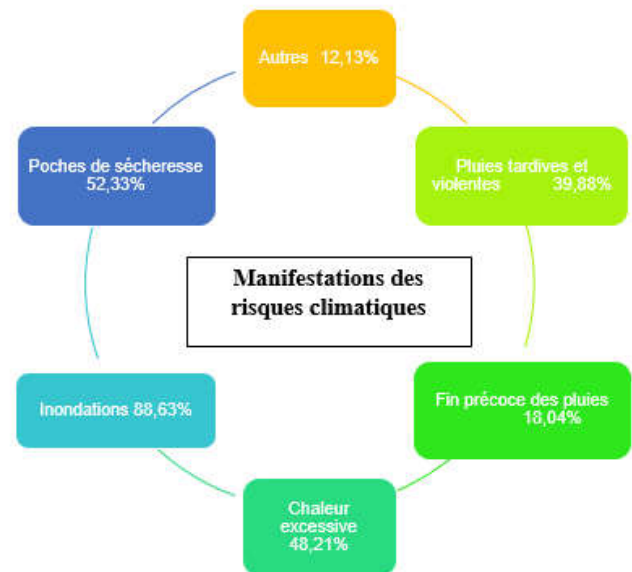


Figure 11 : Manifestations des variations climatiques dans le bassin du Mono au Bénin

Sources : Enquêtes de terrain, 2023

De l'analyse de la figure 11 il ressort que les manifestations des variations climatiques perçues par les populations du bassin du Mono au Bénin sont entre autres les inondations (88,63 %); les poches de sécheresse (52,33%); la chaleur excessive (48,21%); le dérèglement des saisons pluvieuses avec les pluies qui surviennent de plus en plus tardivement et de façon violentes (39,88%) et qui prennent fin parfois précocement (18,04%). Ces différentes variations climatiques perçues par les populations induisent plusieurs conséquences dans le secteur de recherche.

Conséquences des variations climatiques dans le bassin du Mono au Bénin

La figure 12 illustre les conséquences des variations hydroclimatiques dans le secteur d'étude.

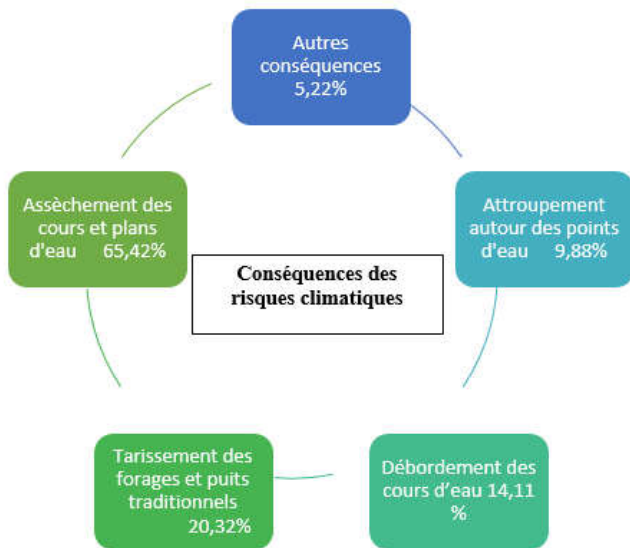


Figure 12 : Conséquences des variations climatiques dans le bassin du Mono au Bénin

Sources : Enquêtes de terrain, 2023

De l'analyse de la figure 12 il ressort que, dans le bassin du Mono au Bénin, l'assèchement des cours et plans d'eau (65,42%), le tariissement des forages et puits traditionnels (20,32%), le débordement des cours d'eau en période de pluie (14,11%), l'atroupement aussi bien des populations que des animaux autour des points d'eau (9,88%) sont les principales conséquences induites par les variations climatiques.

Discussion

Ce chapitre a permis de mettre en évidences les influences de la dynamique hydroclimatique sur les ressources en eau du bassin du Mono au Bénin. L'analyse des hauteurs pluviométriques révèle que le bassin a connu une évolution pluviométrique contrastée. La période 1970-1987 a enregistré des tendances à la baisse des hauteurs de pluies. Par contre, la période 1988-2021 semble décrire une légère hausse des hauteurs de pluies comparativement à la période précédente et celle de 1960-1969. Les résultats obtenus par E. Y. Atiyè (2017, p. 108), corroborent ceux obtenus dans cette recherche. En effet, l'observe après analyse des hauteurs pluviométriques dans le bassin du Mono, une première séquence humide avant 1970 et une deuxième séquence humide à partir de 1989. Pour lui, ces deux périodes sont intercalées par une période sèche très déficitaire. La variation du niveau des précipitations dans le temps montre que la variation au cours des années 2000 n'est pas significative même si elle existe sur la période d'étude dans le bassin. De même, W. A. Tckoki (2019, p. 47), semble aller dans le même sens que les résultats obtenus dans cette recherche puisqu'il estime qu'à Grand-Popo, les excédents pluviométriques sont plus significatifs durant la période 1983-1997 tandis que la période 1998-2015 est caractérisée par une prépondérance d'années déficitaires (60%, 10 sur 17 années). En outre, pour l'auteur, c'est au cours de cette période de 1998-2015 que les années les plus déficitaires ont été observées et il parvient à la conclusion que cela traduit la baisse observée ces dernières années des hauteurs pluviométriques et révélée par 91%

des producteurs interrogés. D. H. Koumassi (2014, p. 119), a quant à lui montré l'influence des fluctuations pluviométriques dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri, et estime que la crue qui a une probabilité sur deux à 212 m³/s, la crue décennale à 333 m³/s et la crue cinquantennale à 440 m³/s dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Ces valeurs caractéristiques correspondent à une moyenne des quantiles obtenus selon les différentes lois retenues.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que, les pluies moyennes de 1322,30 mm ont entraîné un écoulement moyen de 243 mm, des infiltrations moyennes de 322 mm et une évapotranspiration de 657 mm. Il s'ensuit donc que pour 100% de pluie dans le bassin, 49,70% sont destinées à l'évapotranspiration, 18,38% à l'écoulement et 24,35% à l'infiltration. Aussi, il ressort que, pour une hauteur de pluie de 100% reçue dans le bassin du Mono au Bénin, en moyenne 73% sont évaporées. Aussi, 15,67% constituent l'écoulement et 12,33% représentent la recharge. La sous-période 1987-2006 est celle qui a connue moins d'écoulement avec 8% des totaux pluviométriques contre 20% pour la sous-période 2007-2021. Cette dernière sous-période semble cependant enregistrer les plus faibles recharges de la nappe phréatique avec 8% des hauteurs pluviométriques. Faisant le bilan hydrologique, (E. Y. Atiyè (2017, p. 122), montre qu'à l'échelle annuelle, l'évapotranspiration représente à elle seule plus de 50% du bilan hydrologique tandis que le stockage avoisine les 35-40%. Ainsi, pour lui, la plus grosse part de la pluie tombée s'évapore tandis que 11-13% se transforme en écoulement. Aussi, S. Ogowalé (2022, p. 94), obtient les résultats similaires dans le bassin de l'Okpara à Nano. l'auteur montre que, pour 100% de pluie dans le bassin, 66% sont destinées à l'évapotranspiration, 12% à l'écoulement et 20% l'infiltration. L'auteur révèle également que, l'évaporation reste élevée dans le bassin au détriment des autres termes du bilan hydrologique. Dans le même ordre d'idée, les simulations réalisées E. R. Dossou-Yovo (2011, p. 04), prévoient, à l'horizon 2025, une diminution de l'écoulement de surface de 37%, une réduction de l'écoulement souterrain de 20,25%, une réduction de la recharge des aquifères de 18,60% et une réduction de la production d'eau du bassin de 28,22%. Par contre, l'évapotranspiration augmentera de 4%.

Les résultats obtenus indiquent également que, les manifestations des variations climatiques perçues par les populations du bassin du Mono au Bénin sont entre autres les inondations (88,63%); les poches de sécheresse (52,33%); la chaleur excessive (48,21%); le dérèglement des saisons pluvieuses avec les pluies qui surviennent de plus en plus tardivement et de façon violentes (39,88%) et qui prennent fin parfois précocement (18,04%). De ce fait, dans le bassin du Mono au Bénin, l'assèchement des cours et plans d'eau (65,42%), le tariissement des forages et puits traditionnels (20,32%), le débordement des cours d'eau en période de pluie (14,11%), l'atroupement aussi bien des populations que des animaux autour des points d'eau (9,88%) sont les principales conséquences induites par les variations climatiques. Dans le même d'étude, W. A. Tchoki (2019, p. 06) affirme que, les principaux risques climatiques auxquelles les producteurs font face sont : les poches de sécheresse, les pluies tardives et violentes, la fin précoce, la chaleur excessive, l'élévation du niveau de la mer et les inondations. Il fait l'analyse de la vulnérabilité de la production maraîchère à ces risques climatiques, et montre que les risques climatiques majeurs sont les Pluies tardives 76% suivi des Poches de sécheresses et la Fin précoce des pluies 70% et que la culture du piment 83% de la tomate 70% et carotte 70% sont les plus exposées dans la Commune de Grand-Popo. Pour F. A. Maboulou (2020, p. 61), les inondations 80% et la sécheresse 70% sont les risques hydroclimatiques majeurs dans la Commune de Athiémié. Les travaux de A. D. Tidjani *et al.*, (2016, p. 10) dans le système oasien de Gouré (Sud-est Niger) confirment ces

manifestations de la variabilité hydroclimatique. La construction de barrages (56,23%) et la réalisation de forages (13,80%), la réalisation des retenues d'eau (50,84%) et la mise en place des cultures maraîchères (30,64%) se révèlent comme des alternatives dans le bassin pour faire face aux conséquences de des variations hydroclimatiques. Dans la même logique, B. T. Donou (2015, p. 160), obtient les résultats similaires dans le bassin inférieur du fleuve du Ouémé et précise que les ressources les plus exposées aux extrêmes hydroclimatiques sont les cycles de croissance des cultures et les techniques de conservation des récoltes.

CONCLUSION

Au terme de cette recherche il ressort de l'analyse de l'évolution interannuelle des pluies et débits moyens du bassin du Mono au Bénin que, la période avant les années 1970 a été globalement plus humide par rapport aux décennies des années 1980 et qu'à partir des années 1990, on note une légère augmentation des hauteurs de la lame d'eau écoulée. Ces résultats sont en phases avec les années de rupture observées dans les chroniques de pluies. Il convient donc de dire que la variabilité pluviométrique a réellement eu des répercussions sur la dynamique hydrologique du bassin du Mono au Bénin.

Depuis quatre décennies (période équivalente au début des années 70) les changements intervenus dans le régime des précipitations et des températures. Les manifestations des variations climatiques perçues par les populations du bassin du Mono au Bénin sont entre autres les inondations (88,63%); les poches de sécheresse; la chaleur excessive ; le dérèglement des saisons pluvieuses avec les pluies qui surviennent de plus en plus tardivement et de façon violentes et qui prennent fin parfois précocement. Ces différentes variations climatiques perçues par les populations induisent plusieurs conséquences telles que l'assèchement des cours et plans d'eau, le tarissement des forages et puits traditionnels, le débordement des cours d'eau en période de pluie, l'attroupement aussi bien des populations que des animaux autour des points d'eau sont les principales conséquences induites par les variations climatiques.

BIBLIOGRAPHIQUES

AGHRAB Abdallah, 2003, Caractérisation de la sécheresse et élaboration des indicateurs climatiques pour son alerte précoce dans la région de Saïss. Mémoire de fin d'études. École Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc. 16p.

AHEHEHINNOU YEDO Mahougnon Fidèle 2020, Dynamique éco sédimentaire du chenal lagunaire Gbaga dans le contexte de la variabilité climatique (Afrique de l'Ouest), Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-calavi, 280 p.

AMOUSSOU Ernest 2014, Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit, 2014. halshs-01143318, 27p.

AMOUSSOU Ernest, 2010, Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Du fleuve Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest).Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 311p.

ATCHADE AssaïAkinni Gervais, 2014, Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière zou dans le Bénin méridional. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 235p

Atiyè Emile Yaovi, 2017, Caractérisation des risques hydroclimatiques dans le bassin versant béninois du fleuve Mono à l'exutoire d'Athiémé. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 254 p.

DONOU Tolidji Blaise, 2015, Extrêmes hydro-climatiques dans le bassin inférieur du fleuve Ouémé : diagnostic, impact agricole et scénarios de gestion. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 264 p.

DOSSOU-YOVO Elliot Ronald, 2011, Impacts des changements climatiques et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua à l'horizon 2025. Diplôme d'Etudes Approfondies, DAGRN/FSA/UAC, 132p.

GIEC, 2014, Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse finale du GIEC sur le Climat, 180p.

GIEC, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième, Rapport d'évaluation sur l'évolution du climat. Equipe de rédaction principale : suisse 303p.

GOUAIDIA Layachi 2008, Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est Algérien. Thèse de Doctorat, Hydrogéologie, Faculté des Sciences de la Terre, Département de Géologie, 200 p.

HOUNDENOU Constant, 1999, Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de doctorat de géographie, UMR 5080, CNRS « climatologie de l'espace tropical », Université de Bourgogne, centre de recherche de climatologie, Dijon, 341 p.

KOUDAMILORO Olivier, 2017, Vulnérabilité aux risques hydroclimatiques et stratégies d'adaptation des populations dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou (Benin). Thèse de Doctorat unique de géographie. Université Ouaga 1 PR Joseph Ki-Zerbo, 274p.

KOUMASSI Dègla Hervé, 2014, Risques hydro-climatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la sota à l'exutoire de Coubéri. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 245 p.

MABOULOU Adjéoda François, 2020, extrêmes hydroclimatiques et sécurité alimentaire dans la Commune de Athiémé. Mémoire de Master, MIRD/IGATE/UAC, 93p.

McKEE Thomas .B., DOESKEN Nolan J., et KLEIST Jonh, 1993, La relation entre la fréquence et la durée de la sécheresse et les échelles de temps. In: Eighth Conference on Applied Climatology. Pp 17-22.

OGOUWALE Sylvestre, 2022, Variabilité hydroclimatique et stratégie de Gestion Intégrée des ressources en eau du sous bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Nano. Thèse de Doctorat Unique, EDSAE /FSA/UAC, 236 p.

OMM, 1992, Vocabulaire météorologique international. 2ème Ed., n° 182, 784 p.

PETTITT A. N., 1979, A non-parametric approach to the change-point problem. Applied Statistics, 28, n°2, pp. 126-135.

SALL Moussa 2015, Les exploitations agricoles familiales face aux risques agricoles et climatiques : stratégies développées et assurances agricoles, thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 277p.

SIRCOULON Jean, 1990, Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD-n°380, 87p.

TCHOKI William Apollinaire, 2019, Vulnérabilité et adaptation de la production maraîchère aux phénomènes climatiques extrêmes dans la Commune de Grand-Popo. Mémoire de Master, MIRD/IGATE/UAC, 87p.

- VISSIN Expédit Wilfrid, HOUSSOU Christophe Sègbè et SINTONDJI Luc, 2011 : Stratégies endogènes d'adaptation aux risques hydroclimatiques dans le bassin du Zou, in JS du 2IE, Ouaga, 4p.
- VISSIN Expédit Wilfrid, 2007, Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 310p.
