

Variabilité pluviométrique en zone soudanienne au Niger de 1960 à 2022 : Cas de la ville de Gaya

Garba Boubacar^{1,*}, Abdoul A. Saidou Chaibou², Inoussa Abdou Saley²

¹Université Djibo Hamani de Tahoua, Faculté des Sciences de l'Éducation, Département des didactiques des disciplines

²Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Physique

Reçu : 12 Février 2024 / Reçu sous sa forme révisée : 02 Mai 2024 / Accepté : 16 Mai 2024

Résumé :

Le présent travail est basé sur la configuration d'un algorithme dont nous avons cherché un maximum de quatre points de rupture au niveau des cumuls pluviométriques (moyennes) annuels des précipitations observées à Gaya situé dans la zone climatique soudanienne. L'algorithme repose sur la méthode de recherche de point unique de changement élargi à plusieurs points de changement, en répétant de manière itérative la méthode de point unique sur les différents sous-ensembles obtenus de la première itération. Les tendances obtenues ne sont représentatives que lorsqu'elles sont statistiquement significatives au seuil de 5% selon le test non paramétrique de Mann-Kendall. Ce test a été appliqué aux séries chronologiques des anomalies de l'Indice Standardisé de Précipitation (ISP) sur la période d'étude (1960-2022). À partir des anomalies des précipitations, nous avons cherché l'existence des tendances et/ou des périodes de stationnarité par l'identification des points de rupture. L'évolution des anomalies des précipitations n'indique pas de période de rupture avec une tendance croissante non significative sur la période d'étude (1960-2022). Deux méthodes de traitement de données ont été appliquées. Ce sont, l'analyse en composantes principales (ACP) et le coefficient de variation (CV). Le résultat de l'ACP montre que la pluviométrie est homogène sur la période d'étude à Gaya. Le coefficient de variation pluviométrique est faible ($CV=13,62\% < 15\%$), ce qui indique une faible variation de la pluviométrie. Bien que la station soit bien arrosée, l'évolution des précipitations annuelles a fait ressortir la période sèche des décennies 1970 et 1980 et la reprise pluviométrique des années 1990.

Mots-clés : Pluviométrie ; Tendances ; Variabilité ; Gaya.

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail: gboubacar5@gmail.com (B. Garba)

Abstract:

This study is based on the configuration of an algorithm for which we sought a maximum of four break points in the level of the annual rainfall totals (average) of the rainfall observed in Gaya located in the Sudanian climatic zone. The algorithm is based on the single change point search method extended to several change points by iteratively repeating the single point method on the different subsets obtained from the first iteration.

The trends obtained are only representative when they are statistically significant at the 5% threshold according to the non-parametric Mann-Kendall test. This test was applied to the time series of anomalies of the Standardized Precipitation Index (SPI) over the study period (1960-2022). Thus, the SPI was used to determine dry ($SPI < -0.5$), normal ($-0.5 < SPI < 0.5$) or wet ($SPI > 0.5$) years. In addition, exceptionally wet ($SPI > 1$) or dry ($SPI < -1$) years were also sought, suggesting the existence of more than one break point as in the previous method. From precipitation anomalies, we looked for the existence of trends and/or periods of stationarity by identifying break points. The evolution of precipitation anomalies does not indicate a period of abrupt change with a non-significant increasing trend over the study period (1960-2022). Two data processing methods were applied. These are principal component analysis (PCA) and coefficient of variation (CV). The PCA result shows that the rainfall is homogeneous over the study period in Gaya. The coefficient of variation of rainfall is low ($CV = 13.62\% < 15\%$), which indicates a low variation in rainfall. Although the station is well watered, the evolution of annual precipitation highlighted the dry period of the 1970s and 1980s and the resumption of rainfall in the 1990s.

Keywords: Rainfall; Trend; Variability; Gaya.

1 Introduction

En Afrique de l'ouest, particulièrement dans les pays émergents, le secteur agricole est le plus affecté par les tendances et la variabilité climatique [1]. D'après l'étude de Spinoni et *al.* [2], cette région connaît depuis 1950 le déficit pluviométrique le plus important du monde. Cette tendance à l'aridification pourrait se prolonger durant le 21^{ème} siècle [3]. Par ailleurs, cette dégradation des précipitations annuelles est accompagnée d'une hausse considérable des phénomènes météorologiques violents au cours des trente-cinq dernières années dans le Sahel [4].

La région sahélienne est considérée comme l'une des régions les plus vulnérables du monde [5]. Cette vulnérabilité est en partie causée par la variabilité de la mousson ouest-africaine, principale ressource en eau pour l'agriculture dans la région. Par exemple, de 1990 à 2006, le Sahel a connu une plus grande variabilité spatiale et interannuelle des précipitations que celles des périodes précédentes 1950-1969, globalement plus humides, et 1970-1989, globalement sèches [1, 6]. Diouf et *al.* [7] soulignent dans leur étude que dans les zones soudano-sahéliennes, cette tendance s'est traduite par un glissement des

isohyètes de l'ordre de 150 à 200 km vers le sud.

Le Niger comme la plupart des pays du Sahel, a connu plusieurs pluies de fortes intensités qui pourraient être l'un des éléments responsables des inondations de ces dernières années dans les différentes villes du pays. C'est le cas par exemple, des graves inondations de 2012 qui ont touché plusieurs régions du pays [8]. Cette situation pluviométrique a également concerné la région de Dosso où de fortes pluies ont été enregistrées, occasionnant plusieurs cas d'inondations surtout dans le département de Gaya [9].

Plusieurs études se sont focalisées sur les variations du cumul pluviométrique annuel au Niger par l'utilisation de l'indice pluviométrique [6, 8, 10 – 15]. Ces études ont montré le caractère particulier de la station de Gaya. En effet, cette station n'indique aucune période de stationnarité. De plus, elle ne montre pas de variations significatives dans les séries des précipitations (tendance croissante non significative). Cependant, ces dernières années, en Afrique, on assiste à un retour de la pluviométrie vers des conditions plus humides, alternant des années sèches et humides mais surtout marquées par une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes [4, 16 – 18]. Dans cette étude, nous allons analyser les variations des cumuls de la pluviométrie (moyennes) annuels observées à Gaya (1960-2022) pour identifier l'évolution des précipitations sur la période d'étude choisie.

2 Données et Méthodologie

2.1 Présentation de la zone d'étude

Le Niger est un pays sahélien, situé au sud du Sahara et s'étend sur 1 267 000 km². Les caractéristiques climatiques du Niger s'expliquent par sa proximité avec le désert saharien mais aussi par son éloignement des océans. Les précipitations connaissent un gradient positif du nord au sud qui détermine quatre zones climatiques (figure 1). La distribution intra-saisonnière des précipitations montre un régime pluviométrique avec un maximum annuel au mois d'août.

Dans cette étude, nous avons choisi la station de Gaya, située dans la zone soudanienne du pays (latitude 11,88° N et longitude 3,45° E).

Le choix de cette station représentant environ 1% de la superficie totale du pays s'explique par le fait qu'elle reçoit entre 600 et 800 mm de pluie en moyenne par an. Elle est plus propice à la production agricole et animale et permet d'évaluer l'impact sur les cultures.

2.2 Données

Dans cette étude, nous avons utilisé les données historiques des précipitations annuelles sur la période 1960-2022 de la station de Gaya. Ces données sont issues de la banque de données de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN).

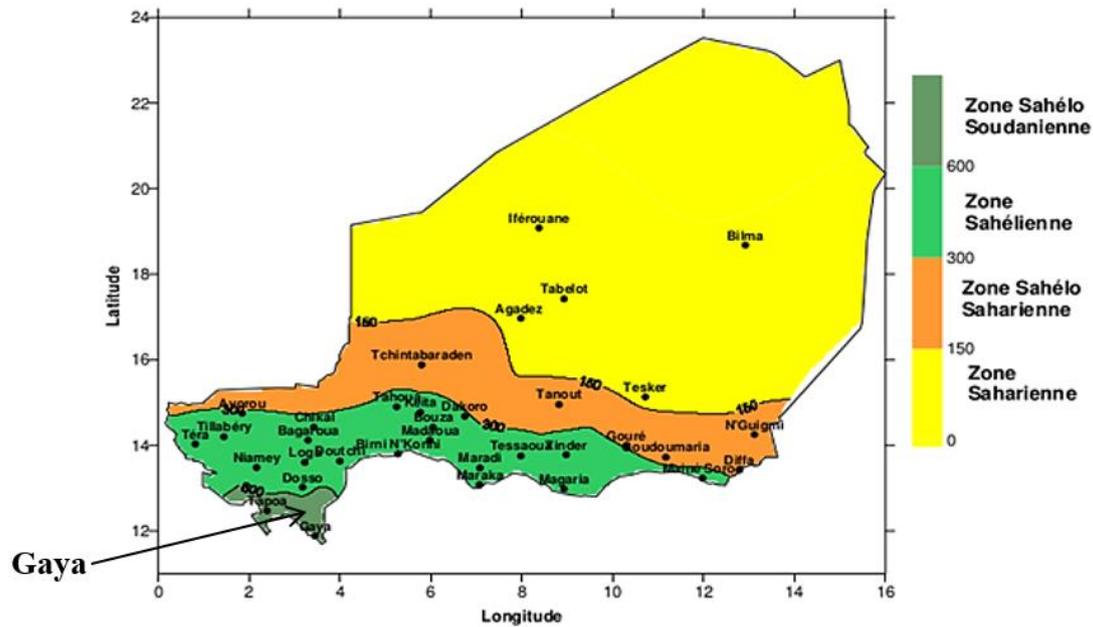


Fig. 1. Les principales zones climatiques du Niger (**Source :** Direction de Météorologie Nationale du Niger, 2012).

2.3 Méthodologie

Nous cherchons à déterminer l'évolution et l'existence des ruptures et/ou de tendance dans les séries chronologiques des précipitations. L'analyse des points de changement ou points de rupture peut être considérée comme l'identification de points dans l'ensemble de données où les propriétés statistiques changent et divisent l'ensemble de données en des segments homogènes distincts donnant lieu à des périodes de stationnarité [19]. Aussi, avons-nous considéré qu'il y a rupture lorsqu'il est observé un changement dans la moyenne et la variance d'une variable donnée. L'approche utilise un algorithme de segmentation binaire qui est une des méthodes les plus utilisées dans la littérature sur les points de changement [19 – 21]. La segmentation binaire repose sur la méthode de recherche de point unique de changement élargie à plusieurs

points de changement en répétant de manière itérative la méthode de point unique sur les différents sous-ensembles, obtenus de la première itération. Pour une variable donnée, si après la première itération, il n'y a pas de rupture, donc pas de sous-ensembles, alors l'algorithme s'arrête. Dans la configuration de l'algorithme utilisée, nous avons cherché un maximum de quatre points de rupture dans la série de données utilisée.

Concernant l'analyse de tendance (à la hausse ou à la baisse), elle a été effectuée à l'aide de régressions linéaires entre la variable d'intérêt $y(t)$ et la date t : $y(t) = at + b$, où a est la pente et b l'ordonnée à l'origine de la droite recherchée [22]. Le coefficient de pente de la régression nous renseigne sur le signe de la tendance. Selon Rivard et al. [22], la méthode de la régression à elle seule n'est pas suffisante pour affirmer une tendance.

L'hypothèse H_0 testée est « il n'y a pas de tendance ». La valeur propre $p < \alpha$ (seuil de significativité) n'est représentative que lorsqu'elle est statistiquement inférieure à 5% selon le test non paramétrique de Mann-Kendall [23]. L'hypothèse H_0 est rejetée quand on conclut à l'existence d'une tendance significative au seuil choisi [24]. Ce test a été appliqué aux séries chronologiques des anomalies de l'Indice Standardisé de Précipitation (ISP) pour les données de précipitations sur la période d'étude. Traditionnellement, l'ISP est calculé par l'équation (1) de Lamb [25].

$$X'_{ij} = \frac{(X_{ij} - \bar{X}_i)}{S_i} \quad (1)$$

Où X'_{ij} est l'ISP pour la station i et l'année j ; X_{ij} est le cumul annuel de la précipitation à la station i et pour l'année j ; \bar{X}_i est la pluie moyenne interannuelle sur la période de référence (1981-2010) pour la station i ; S_i est l'écart type des cumuls annuels sur la même période de référence et pour la même station.

Ainsi, l'ISP a servi à déterminer les années sèches ($ISP < -0,5$), normales ($-0,5 < ISP < 0,5$) ou humides ($ISP > 0,5$) [6]. En outre, des années exceptionnellement humides ($ISP > 1$) ou sèches ($ISP < -1$) ont été aussi recherchées, laissant supposer l'existence de plus d'un point de rupture comme dans la méthode précédente.

2.4 Méthodes de traitement et analyse des données

La recherche de structures spatiales pluviométriques homogènes repose sur la constitution d'une matrice de données de pluie de la station de Gaya et de 63 années allant de 1960 à 2022. Une approche d'analyse multidimensionnelle des données

a été appliquée. Il s'agit de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) qui est l'une des méthodes d'analyse la plus utilisée pour extraire des modes cohérents de variabilité spatio-temporelle dans les champs de précipitations simulées par les modèles numériques en Afrique de l'Ouest [26]. La contribution des mois de la saison pluvieuse au cumul pluviométrique annuel a été également appliquée. L'analyse des graphes et des contributions a permis de déterminer deux types de graphiques au niveau de la station (le cercle de corrélation et le graphique d'observation). En ce qui concerne la méthode de l'ACP, les cumuls pluviométriques annuels de la station ont été calculés puis soumis à cette méthode. Une rotation varimax a été appliquée aux axes principaux (F_1 et F_2). Les seuils de signification statistique utilisés pour déterminer le nombre de composantes principales sont donnés par le module d'analyse des données dans Excel avec XLSTAT.

Pour plus d'informations sur la cohérence et la fiabilité des données, nous avons recherché à estimer le coefficient de variation CV [27]. Ce coefficient est calculé à partir de l'équation (2) :

$$CV = \frac{\sigma}{X} \times 100 \quad (2)$$

σ est l'écart-type de la variabilité des précipitations sur la période d'étude; X est la pluviométrie annuelle moyenne pour chaque année de la période d'étude.

CV inférieure à 15% indique une faible variabilité, CV comprise entre 15% et 30% indique une variabilité modérée et CV supérieure à 30% indique une variabilité élevée.

3 Signification de l'indice standardisé de précipitation (ISP)

Dans un premier temps, une méthode de référence a été proposée pour calculer l'ISP (1981-2010) à partir des champs de pluie annuels. Il a été montré que cette méthode donne des résultats légèrement meilleurs que les méthodes traditionnelles trouvées dans la littérature en cas d'irrégularité ou de sous-échantillonnage des champs pluviométriques annuels [19]. Un sous-produit de la méthode est d'utiliser l'écart-type de krigeage de l'erreur d'estimation comme mesure permettant d'évaluer la significativité ou non, des anomalies de précipitations annuelles. L'ISP est généralement utilisé pour déterminer les classes d'années (sèches, normales ou humides) [6]. Cependant, plusieurs auteurs ont identifié les changements du régime pluviométrique au Sahel par l'utilisation de la méthode des indices standardisés des précipitations ISP [6, 28 – 32].

4 Résultats et discussion

4.1 Variabilité interannuelle des précipitations

4.1.1 Tendances et variabilité interannuelle du cumul annuel

La figure 2 représente les variations interannuelles des précipitations recueillies au niveau de la station de Gaya sur la période 1960-2022. Cette figure montre une alternance entre années humides et années

sèches. La courbe de tendance représentée en rouge, montre une croissance des cumuls de précipitations (1,261 mm/an) sur la période de 1960-2022. La moyenne annuelle des précipitations au cours de cette période est de 819,05 mm. Gaya est la région la plus arrosée du pays, située dans la zone climatique soudanienne. Bien que la station soit bien arrosée, nous y remarquons une grande variabilité des précipitations avec une alternance entre années relativement humides (précipitations supérieures à la moyenne) et années relativement sèches (précipitations inférieures à la moyenne). Près de 50% des années ont enregistré des précipitations supérieures à la moyenne (819,05 mm). Nous pouvons remarquer cependant, que la courbe de tendance est croissante (1,261 mm/an sur la période de 1960 à 2022), donc une tendance à l'humidification de la station. En termes d'amplitude, la pluviométrie annuelle présente une forte variabilité d'une année à une autre. Cette évolution a fait ressortir la période sèche des décennies 1970 et 1980 et la reprise pluviométrique des années 1990. Des résultats similaires ont été établis par différents auteurs [1, 31, 33]. Dans ces travaux, les limites des périodes d'étude sont respectivement 2010 [1], 2006 [31] et 2014 [33]. Tandis que dans le présent travail, la période d'étude est élargie à 2022. La pluie moyenne et extrême du cumul annuel est récapitulée dans le tableau 1. Il en résulte que la pluviométrie moyenne interannuelle sur la période d'étude est plus grande que la pluviométrie moyenne interannuelle minimale (1973) ; c'est l'année la plus déficitaire de la période. La pluie a été excédentaire en 2018 dans la zone soudanienne au Niger (Gaya) ; c'est l'année la plus humide de la période 1960-2022.

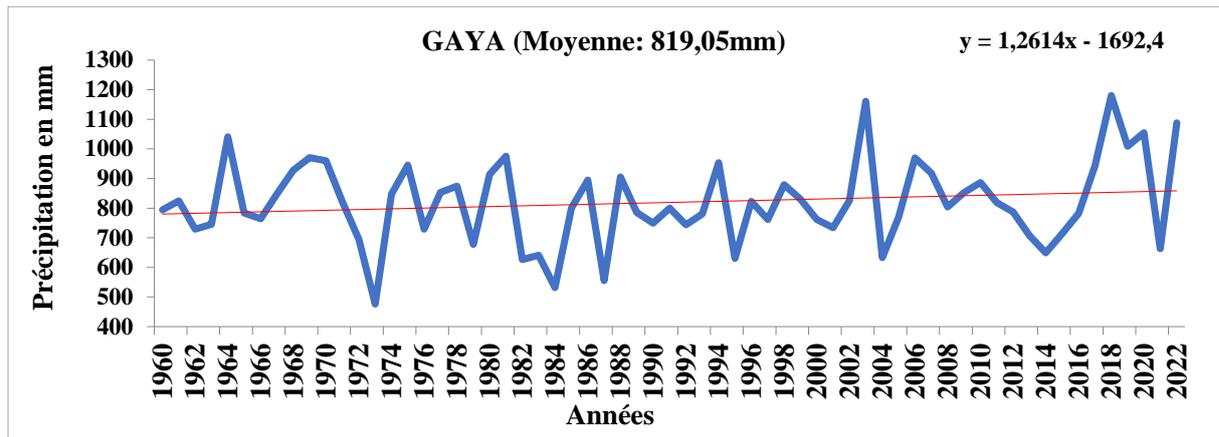


Fig. 2. Evolution des précipitations annuelles observées à Gaya de 1960-2022 au pas de temps 2 ans.

Tableau 1

Pluie moyenne et extrêmes des cumuls annuels à la station de Gaya.

Moyenne	Minimum		Maximum	
819,05 mm	Valeur (mm)	Année	Valeur (mm)	Année
	476,1	1973	1180,5	2018

4.1.2 Evolution interannuelle des anomalies des précipitations

La figure 3 montre les variations de l'indice de Lamb de 1960 à 2022 pour la station de Gaya.

Afin de mieux caractériser la variabilité interannuelle des précipitations au niveau de la station de Gaya, nous avons étudié la variabilité interannuelle des anomalies standardisées des précipitations. Celle-ci a permis de mettre en évidence les alternances des années humides et sèches sur la période d'étude. Il apparait une période nettement sèche allant de 1960 à 2015 avec l'année 1973 qui a enregistré le cumul annuel de pluie le plus bas (~476,1 mm). Cette période est précédée par une autre très humide (2016-2022) avec l'année 2018 qui a enregistré le cumul

annuel de pluie le plus élevé (~1180,5 mm). Cela ne marque pas une période de rupture, ce qui n'indique pas des changements à la fois dans la moyenne mais aussi dans la variance des pluies à Gaya. Au cours des années postérieures à 2015, l'occurrence relativement importante des années humides a eu comme conséquence une certaine augmentation de la pluviométrie moyenne qui pourrait être à la base de la tendance croissante des pluies observée sur la période d'étude (figure 3). Ce retour de la pluviométrie pourrait être dû à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies dans la sous-région [4, 18]. D'autres résultats de recherche suggèrent également que le possible retour de la pluie s'explique davantage par l'augmentation des gaz à effet de serre atmosphériques et de celle d'aérosols [34].

L'analyse de la variabilité pluviométrique au moyen de l'indice pluviométrique standardisé montre une alternance entre une période nettement sèche de 1960 à 2015 suivie d'une période très humide dans les années 2016-2022. La station de Gaya n'indique pas de périodes de stationnarité ne montrant pas des changements dans les séries des précipitations avec une tendance croissante non significative. Contrairement à l'étude menée par Ozer et al. [33] sur tout le Niger, le plus souvent les ruptures des ISP sont situées entre 1960 et 1970.

La figure 3 présente la variabilité interannuelle des anomalies standardisées des précipitations avec une moyenne annuelle de 819,05 mm sur la période d'étude. Cette variabilité permet de mettre en évidence des années particulièrement humides (1964, 2003, 2018, 2020 et 2022) avec un indice de Lamb de l'ordre de (+1,5 à +3) et des années particulièrement sèches (1973, 1982, 1984 et 2004) avec un indice de Lamb compris entre (-1,5 et -3). La courbe de tendance de l'indice de Lamb avec une pente de 1,19 mm/an indique que la variation de la pluviométrie est à la hausse.

4.1.3 Structures spatiales de la variabilité pluviométrique

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de déterminer les corrélations entre les variables et les facteurs, la distribution des postes dans les plans factoriels et les niveaux de corrélation selon les axes. Les contributions des variables (%) des deux composantes principales (ou axes ou facteurs) sont résumées respectivement dans les tableaux 2, 3 et 4.

Les deux composantes principales F_1 et F_2 expliquent 100% de la variabilité (tableau 2). La variabilité expliquée par la composante F_1 et le cumul ont le même le pourcentage (58,174%). Par contre, la variabilité (41,826%) expliquée par la composante F_2 diminue quand le pourcentage du cumul augmente. La première composante F_1 représente 58,17% de l'information initiale avec pour valeur propre 1,16, tandis que la deuxième composante F_2 indique 41,82% avec pour valeur propre 0,83. Cela signifie que le comportement de la pluviométrie de la station de Gaya sur la période d'étude 1960-2022 est résumé par les deux composantes principales F_1 et F_2 qui concentrent 100% de l'information. Il ressort de l'analyse du tableau 2 que toutes les valeurs propres des deux composantes principales F_1 et F_2 diffèrent au seuil de 5%, et que toutes les composantes principales présentent une valeur de p (1,163 en composante principale F_1 et 0,837 en composante principale F_2) qui est non significative ($> 0,05$).

L'analyse des tableaux 3 et 4 de sortie des données, obtenus avec EXCEL XLSTAT montre au niveau du tableau 3 que les précipitations sont positivement corrélées (0,763) pour la composante principale F_1 et négativement corrélées (-0,647) pour F_2 . Par contre, le tableau 4 fait ressortir le même pourcentage des variables (années et précipitations). Ce qui signifie que la pluviométrie est homogène aux niveaux des deux composantes principales F_1 et F_2 . Sur la figure 4 est présentée la distribution des postes d'ACP.

L'analyse de la figure 4 montre une variabilité spatio-temporelle des coefficients de corrélation selon les composantes principales. Chaque graphe indique une

variabilité des cumuls pluviométriques des postes d'observation selon les niveaux de corrélation par composante. Les axes F_1 et F_2 représentent 58,17% de l'information de jeu de données initiales et les axes F_1 et F_3 représentent 41,82% de l'information de jeu de données initiales. Ainsi, nous focalisons notre interprétation sur les axes F_1 et F_2 . Nous nous concentrons sur deux graphiques essentielles à savoir, le cercle de corrélation et celui du graphique d'observation. Le graphique de corrélation examine le lien entre les années et les cumuls pluviométriques. L'axe horizontal est la première dimension de l'ACP représentant 100% de l'information initiale, l'axe vertical est la seconde dimension de l'ACP et les vecteurs en rouge sont les valeurs étudiées. Ici, la sortie des données doit être interprétée en termes d'angle séparant les variables entre elles sous les dimensions de

l'ACP. La figure 4a montre qu'au niveau de la station de Gaya les variables actives sont positivement corrélées. L'axe F_1 (58,17%) est lié à des variables importantes à droite. Selon la méthode de l'ACP que nous avons exploitée, la taille des vecteurs représente la qualité des cumuls pluviométriques sur la période d'étude. L'observation des figures 4a et 4b montre que la variable est représentée par une dimension élevée, donc l'information paraît plus importante. Le graphique d'observation (figure 4b), nous aidera à évaluer le lien entre les variables actives en rouge et les observations actives en bleu. Là encore, l'axe horizontal est la première dimension de l'ACP et l'axe vertical, la seconde dimension. Les variables actives et les observations actives à droite sont plus grandes et passent moins de temps et ceux à gauche sont plus petits et passent plus de temps.

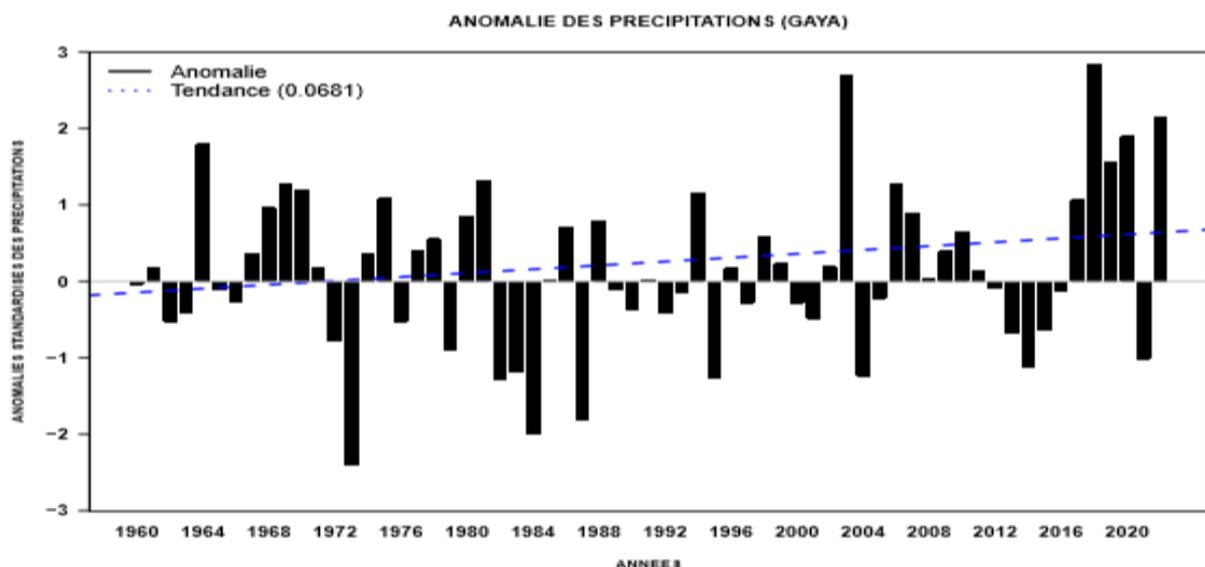


Fig. 3. Variabilité interannuelle des anomalies standardisées des précipitations à Gaya de 1960 à 2022 au pas de temps 4 ans.

(Les barres noires et le tireté bleu correspondent respectivement aux anomalies standardisées des précipitations et aux courbes des tendances).

Tableau 1

Valeurs propres et pourcentage de variabilité pour les deux composantes principales.

	F_1	F_2
Valeurs propres	1,163	0,837
Variabilité (%)	58,174	41,826
% cumulés	58,174	100,000

Tableau 2

Corrélations entre les variables et les facteurs.

	F_1	F_2
Années	0,763	0,647
Précipitation	0,763	-0,647

Tableau 3

Contributions des variables (%).

	F_1	F_2
Années	50,000	50,000
Précipitation	50,000	50,000

4.1.4 Coefficient de variation

Le coefficient de variation (CV) est un outil statistique utilisé pour mesurer la variabilité relative des données [27]. L'interprétation du CV est importante car elle peut fournir un aperçu de la cohérence et de la fiabilité des données.

La variabilité de la pluviométrie est un phénomène qui se retrouve partout. Les caractéristiques significatives de la variabilité de la pluviosité en Afrique de l'ouest sont selon [35], la persistance et l'ampleur de la variabilité. Les écarts de la

pluviométrie par rapport à la moyenne à long terme ont tendance à persister pendant une période assez longue, ce qui entraîne une production agricole traditionnelle instable [36].

Gaya, la station la plus au sud du pays a reçu la pluviosité annuelle moyenne de 819,05 mm sur la période d'étude (1960-2022). Le coefficient de variation au niveau de cette station à forte précipitation sur la période d'étude est de l'ordre de 13,62% (< 15%), ce qui montre que les données sont homogènes et qu'il existe une faible variabilité.

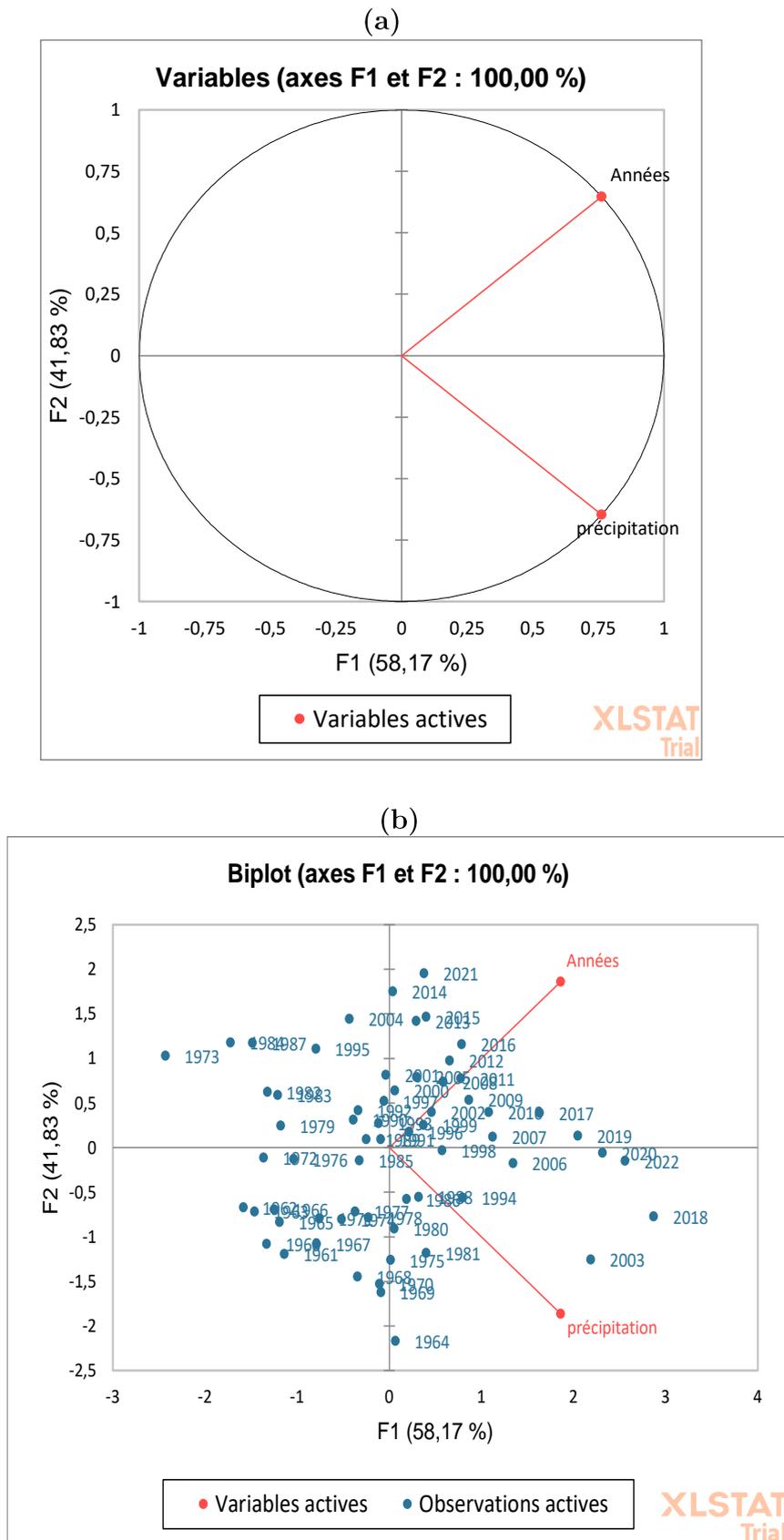


Fig. 4. Distribution des postes d'ACP à partir (a) du cercle de corrélation et (b) du graphique d'observation à Gaya.

5 Conclusion

Dans cette étude, nous avons cherché à mettre en évidence l'existence des périodes de stationnarité et/ou de tendance, en nous basant sur l'évolution interannuelle de la pluviométrie annuelle et les variations interannuelles des anomalies des précipitations de la station synoptique de Gaya au Niger. Cette station subit les effets de la variabilité et du changement climatiques dus respectivement à l'homme et à la nature. Cette évolution a fait ressortir une forte variabilité des précipitations avec une alternance entre années relativement humides (précipitations supérieures à la moyenne) et années relativement sèches (précipitations inférieures à la moyenne). Près de 50% des années ont enregistré des précipitations supérieures à la moyenne (819,05 mm).

Les analyses des anomalies de précipitation ne montrent pas des changements dans la moyenne et la variance, ne caractérisant pas de périodes de stationnarité. En outre, la tendance est statistiquement non significative au niveau de la station de Gaya. L'analyse des précipitations à partir de l'ACP a permis d'identifier des structures spatio-temporelles pluviométriques homogènes à Gaya sur la période d'étude. Cette zone homogène avec un coefficient de variation inférieur à 15% (13,62%) indique une faible variation. Ainsi, cette étude n'a pas mis en évidence des changements dans les régimes de précipitations à Gaya (Niger). Cependant, d'autres analyses plus affinées et notamment concernant les événements climatiques extrêmes devraient être menées pour consolider les résultats obtenus dans ce travail.

Références Bibliographiques

- [1] A. Agali, S. Seyni, Ly Mohamed, L. Issaka, B.T Seydou, S. Benott, *Evolution des risques agro climatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne*, Sècheresse 24 (2013) 282-293.
- [2] J. Spinoni, G. Naumann, H. Carrao, P. Barbosa, J. Vogt, *World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010*, International Journal of Climatology 34 (2013) 2792-2804.
- [3] D. Defrance, G. Ramstein, S. Charbit, M. Vrac, A.M. Famien, B. Sultan, D. Swingedouw, C. Dumas, F. Gemenne, J. Alvarez-Solas, J.P. Vanderlinden, *Consequences of rapid ice sheet melting on the Sahelian population vulnerability*, Proceedings of the National Academy of Sciences 114 (2017) 6533-6538.
- [4] C.M. Taylor, D. Belušić, F. Guichard, D.J. Parker, T. Viscel, O. Bock, P.P. Harris, S. Janicot, C. Klein, G. Panthoug, *Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations*, Nature 544 (2017) 475-478.
DOI:10.1038/nature22069
URL:http://www.iahs.info/uploads/dms/iahs_252_323.pdf
- [5] Ressources Profil de Risque du Changement Climatique : Sahel Occidental October 12, 2021 By USAID.
- [6] A. Ali, T. Lebel, A. Amani, *Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel*, Sècheresse 19 (2008) 227-35.
doi: 10.1684/sec.2008.0148

- [7] M. Diouf, A. Nonguierma, A. Abou, A. Royer, B. Somé, *Lutte contre la sécheresse au Sahel : acquis et perspective au Centre Régional Agrhymet*, Sècheresse 11 (2000) 257-66.
- [8] D. Sighomnou, L. Descroix, P. Genthon, G. Mahé, I. Bouzou Moussa, E. Gautier, I. Mamadou, J.P. Vandervaere, T. Bachir, B. Coulibaly, J.L. Rajot, O. Malam Issa, M. Malam Abdou, N. Dessay, E. Delaitre, O.F. Maiga, A. Diedhiou, G. Panthou, T. Vischel, H. Yacouba, H. Karambiri, J.E. Paturel, P. Diello, E. Mougine, L. Kergoat, P. Hiernaux, *La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?* Sècheresse 24 (2013) 3-13. doi: 10.1684/sec.2013.0370.
- [9] E. Fiorillo, A. Crisci, H. Issa, G. Maracchi, M. Morabito, V. Tarchiani, *Recent changes of floods and related impacts in Niger based on the ANADIA Niger Flood Database*, Climate 6(3) (2018) 59. <https://doi.org/10.3390/cli6030059>
- [10] M. Fodé, O.M. Adamou, *Sécheresse Et Variations Pluviométriques Au Niger De 1950 à 1991*, Annales de l'Université Abdou Moumouni, Tome VII (2003) 117-132.
- [11] Autorité du Bassin du Niger (ABN), 2013 ; D Sighomnou et al, 2012 ; Note sur la situation hydrologique dans le bassin du Niger : Les crues d'août-septembre 2013, Niamey.
- [12] L. Descroix, A. Diedhiou, T. Vischel, D. Nadine, M. Malam Abdou, K. Souley Yero, P. Hiernaux, Scénarios de changements climatiques et de leur impact sur l'hydrosystème et la végétation, Projet de recherche: 'Elevage Climat et Société', ANR (2012).
- [13] D. Sighomnou., A. Ilia, B. Tanimoun, Evénements de crues de juillet à septembre 2010 dans le Niger Moyen, ABN (2010).
- [14] G. Mahé, J.-E. Paturel, *1896-2006 sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers*, C.R. Geosciences 341 (2009) 538-546. DOI: 10.1016/j.crte.2009.05.002
- [15] A. Tarhule, *Damaging rainfall and flooding: the other sahel hazards*, Climatic Change 72 (2005) 355-377. DOI: 10.1007/s10584-005-6792-4
- [16] R.I. Maidment, R.P. Allan, E. Black, *Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa*, Geophysical Research Letters 42 (2015) 1-10. <https://doi.org/10.1002/2015GL065765>
- [17] S. Sanogo, A.H. Fink, J.A. Omotosho, A. Ba, R. Red, V. Ermert, *Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa*, Int. J. Climatol. 35 (2015) 4589-4605.
- [18] S. Salack, I.A. Saley, I. Zabre, Z.L. Namou, Z.L. Ibrahim, K.D. Elida, *Scales for rating heavy rainfall events in the West African Sahel*, Weather and Climate Extremes 21 (2018) 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.05.004>
- [19] R. Killick, P. Fearnhead, I.A. Eckley, *Optimal detection of changepoints with a linear computational cost*, JASA (Journal of the American Statistical Association) 107(500) (2012) 1590-1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>

- [20] A.J. Scott, M. Knott, *A Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance*, *Biometrics* 30(3) (1974) 507–512.
- [21] A.N. Pettit, *A non-parametric approach to the change-point problem*, *Applied Statistics* 28(2) (1979) 126-135.
- [22] C. Rivard, J. Marion, Y. Michaud, S. Benhammane, A. Morin, R. Lefebvre, A. Rivera, Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, Commission géologique Du Canada ressources naturelles Canada dossier Public 1577 (2003).
<http://dx.doi.org/10.4095/214161>.
- [23] M.G. Kendall, *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London (1975).
- [24] P. Sicard, *Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosols. Analyse des tendances spatio-temporelles et des séries chronologiques*, Thèse de Doctorat, Université Lille, France (2006).
- [25] P.J. Lamb, *Persistence of subsaharan drought*, *Nature* 299 (1982) 46-47.
- [26] B. Lotfi. *Prévisibilité des précipitations ouest africaines (échelles intra saisonnières et saisonnières) au travers des simulations type DEMETER et des observations*. Climatologie. Université de Bourgogne (2009).
- [27] https://fastercapital.com/fr/sujet/PAGE_URL
- [28] L. Le Barbe, T. Lebel, *Rainfall Climatology of the HAPEX-Sahel Region during the Years 1950-1990*, *Journal of Hydrology* 188-189 (1997) 43-73.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03154-x](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03154-x).
- [29] S. Nicholson, *The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millennia*, *Glob. Planet. Change* 26 (2000) 137–158.
doi: 10.1016/s0921-8181(00)00040-0
- [30] Y. L'Hôte, G. Mahé, B. Somé, J.P. Triboulet, *Analysis of a Sahelian Annual Rainfall Index from 1896 to 2000; the Drought Continues*, *Hydrological Sciences Journal* 47 (2002), 563-572.
<https://doi.org/10.1080/02626660209492960>.
- [31] A. Ali, T. Lebel, *The Sahelian standardized rainfall index revisited*, *International Journal of Climatology* 29 (2009) 1705-1714.
doi: 10.1002/joc.1832
- [32] S. Souleymane, A.H. Fink, J.A. Omotosho, A. Ba, R. Redl, V. Ermert, *Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa*, *International Journal of Climatology* 35(15) (2015) 4589-4605.
DOI: 10.1002/joc.4309.
- [33] P. Ozer, O. Laminou Manzo, D. Tidjani, B. Djaby, De Longuevillef, *Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014)*, *Geo-Eco-Trop* 41(3) (2017) 375-383.
- [34] B. Dong, R. Sutton, *Dominant role of greenhouse-gas forcing in the recovery of Sahel rainfall*, *Nature Climate Change* 5 (2015) 757–760.
- [35] S.E. Nicholson, J.C. Selato, *The influence of La Nina on African*

rainfall, International Journal of Climatology 20(14) (1981) 1761–1776. doi:10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1761::aid-joc580>3.0.co;2-w

l’Afrique de l’Ouest: le Niger. Bulletin d’information n°5 (1993) ICRISAT, Patancheru, Inde/Direction de la météorologie nationale du Niger, Niamey, Niger.

[36] M.V.K. Sivakumar, A. Maidoukia, R.D. Stern, Agroclimatologie de