

Ibrahima Touré, Mamadou Sarr, Issa Leye and Soussou Sambou  
*Caractérisation et modélisation par GEV de la variabilité climatique sur les ressources en eau dans la région de Kaolack au Sénégal*

*Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement,*

*Vol. (viii), No.1, Mars 2023, pp.85-99*

ISSN Online: 1737-9350; ISSN Print: 1737-6688, Open Access

[www.iiste.org](http://www.iiste.org)

Scientific Press International Limited

Received: Received: 10 February 2023 / Revised: 13 March 2023 / Accepted: March 2023 / Published: March 2023



## Caractérisation et modélisation par GEV de la variabilité climatique sur les ressources en eau dans la région de Kaolack au Sénégal

Ibrahima Touré<sup>1</sup>, Mamadou Sarr<sup>2</sup>, Issa Leye<sup>1</sup>, Soussou Sambou<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Laboratoire d'Hydraulique et de Mécanique des fluides (LHMF) de la Faculté des Sciences et Techniques (F.S.T) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Dakar

<sup>2</sup>Laboratoire des sciences de l'atmosphère et des océans, matériaux-énergies-dispositifs (LSAO-MED), Université Gaston Berger de Saint-louis, Sénégal,

### Résumé

La région de Kaolack, à l'image de plusieurs régions du Sénégal fait face à des périodes de fortes chaleurs et une raréfaction des précipitations, qui ne sont pas sans conséquence sur le développement économique tributaire de l'agriculture. Située au centre ouest du pays, elle est touchée par les effets néfastes du changement climatique. L'objectif de cet article est de mettre en évidence les extrêmes climatiques à partir de données pluviométriques et de températures journalières de 1980 à 2015 par la méthode des indices climatiques du programme RClimdex. Il est aussi question d'évaluer la sévérité de la sécheresse sur les ressources en eau à partir de données pluviométriques annuelles pour la période de 1960 à 2013. Pour ce faire, la méthode utilisée repose sur le calcul de l'Indice Standardisée de Précipitation (SPI) à différents pas de temps. En outre, une modélisation à 3 dimensions est adoptée pour voir l'évolution de la température en fonction de la répartition spatiotemporelle des précipitations journalières. Les résultats ont indiqué une succession de périodes humides et de périodes sèches et une hausse de la majeure partie des indices extrêmes climatiques. De plus, il importe de noter que les périodes de fortes chaleurs ont une influence sur la variabilité spatiotemporelle des précipitations. Enfin le modèle GEV est aussi appliqué pour prédire les périodes de retour des précipitations extrêmes

**Mots clés :** Précipitations, température, Indices climatiques, GEV, Kaolack, Sénégal

### Characterization and GEV modeling of climate variability on water resources in the Kaolack region of Senegal

#### Abstract:

The region of Kaolack, like many other regions of Senegal, is facing heat waves and reduced rainfall. This situation is not without consequence on agriculture, the main economic activity of the region. Located in the center west of the country, it is affected by the harmful effects of climate change. The objective of this article is to highlight the climatic extremes from rainfall data and daily temperatures from 2001 to 2015 by the method of climatic indices of the RClimdex program. It is also a question of evaluating the severity of the drought on water resources from annual rainfall data for the period from 1960 to 2013. To do this, the method used is based on the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI) at different time steps. In addition, a 3-dimensional modeling is adopted to see the evolution of temperature according to the distribution of precipitation. The results indicated a succession of wet and dry periods and an increase in most of the extreme climatic indices. In addition, it is important to note that periods of high heat influence the spatiotemporal variability of precipitation. Finally, the GEV model is also applied to predict the return periods of extreme precipitation events

**Key Words:** Rainfall, Temperature, Climatic index, GEV, Kaolack, Senegal.

<sup>1</sup> Corresponding author: [panoya83@yahoo.fr](mailto:panoya83@yahoo.fr)

## INTRODUCTION

La problématique du dérèglement climatique a toujours été un centre d'intérêt de la communauté scientifique internationale au cours des dernières décennies. En effet, la température moyenne à la surface de la terre s'est déjà réchauffée de 1.09°C depuis l'époque préindustrielle (1850-1900) [1]. De plus, les vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest sont devenues plus intenses et plus longues par rapport aux dernières décennies du 20ème siècle. En réalité, entre 1961 et 2014, la fréquence des journées très chaudes (plus de 35°C) a augmenté de 1 à 9 jours par décennie.

À cela s'ajoutent le stress hydrique et les risques liés à l'eau (sécheresse, inondation) qui aggravent davantage les conflits et les déplacements. Selon les estimations de l'Observatoire des situations de déplacement interne (IDMC) dans son rapport de 2020 [2], 649 448 nouveaux déplacements liés aux catastrophes en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale, sont provoqués principalement par les inondations. Ainsi, l'Afrique subit de manière disproportionnée les conséquences des gaz à effet de serre en dépit de sa faible proportion dans les émissions mondiales (2% à 3%). Ces situations compromettent de plus en plus l'atteinte des Objectifs du Développement Durable (ODD) des Nations Unies [3]. C'est pourquoi de nombreuses études dans le monde ont essayé de comprendre l'évolution et la variabilité du climat [4-7]. D'ailleurs plusieurs travaux ont porté dans des zones différentes pour cerner les extrêmes climatiques. Ainsi [8] indiquent une tendance à la baisse des extrêmes pluviométriques de la majeure partie des stations au Sénégal pour une période de 55 ans et des périodes de retour à la baisse. Selon [9] le modèle GEV ajusté aux précipitations extrêmes de six stations au Sénégal montre que les changements prévus dans les données climatiques ne sont pas uniformes entre les stations et les périodes de retour. Par contre [10] montrent des tendances significatives dans les indices de température, ce qui correspond à la tendance au réchauffement dans cette région de l'Algérie. En plus, la fréquence des journées chaudes a augmenté, tandis que la fréquence des journées froides a diminué. Les indices de précipitations, constitués des précipitations annuelles totales, du nombre de jours de pluie, des précipitations mensuelles maximales sur un jour, des précipitations mensuelles consécutives maximales sur cinq jours ont augmenté alors que les jours de pluie consécutifs ont diminué. De même, [11] affirment que la plupart des indices pluviométriques sont en baisse dans le bassin de Davo en Côte d'Ivoire. Cette diminution s'accompagne d'une hausse des indices de température, ce qui témoigne d'une perturbation au niveau locale. Ces résultats sont quasi similaires à ceux de [12] dans la période de 1960 à 2008 au Tchad. Dans cet élan, les résultats de [13] indiquent un ajustement adéquat du modèle G.E.V par la méthode du maximum de vraisemblance aux données de température maximale pour toutes les stations cibles au Sénégal.

Cependant, s'il est avéré que la plupart des travaux ayant porté sur la variabilité climatique concerne des zones d'études plus étendues comme l'Afrique de l'Ouest [14], le Sahel, le Sénégal il n'en demeure pas moins que rares sont ceux qui s'intéressent à la conformité de ses résultats à l'échelle locale. C'est là, toute la pertinence de cet article portant sur la caractérisation de la variabilité climatique sur les ressources en eau dans la région de Kaolack au Sénégal. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau à l'échelle régionale notamment dans la station de Kaolack au Sénégal.

En d'autres termes, il s'agira d'analyser les séquences de sécheresse météorologique par l'indice pluviométrique de précipitation (ISP) dans l'optique de formuler aux populations impactées des mesures d'atténuation et d'adaptation. De surcroît, les indices extrêmes pluviométriques et de température sont mis en contribution pour une meilleure compréhension des enjeux liés au changement climatique. En second lieu une modélisation à 3 dimensions est utilisée pour établir les liens existants entre l'évolution de la température et la spatialisation des précipitations. Enfin une analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes est appliquée afin d'estimer leur période de retour dans la station de Kaolack.

**Matériel et Méthodes :**

*Zone d'étude*

Située au centre-ouest du Sénégal entre les longitudes -16.95 et les latitudes 14.8, Kaolack est l'une des régions administratives du pays. Elle s'étend sur une superficie de 5 357 km<sup>2</sup> et est bornée par la Gambie. Elle est frontalière avec les régions de Kaffrine et de Fatick (Figure 1). En 2013, sa population était estimée à 918355 habitants soit une densité de 67 habitants au Km<sup>2</sup>. Le climat de la zone d'étude est partagé entre celle de la zone sahélienne Sud et la zone soudanaïenne Nord.

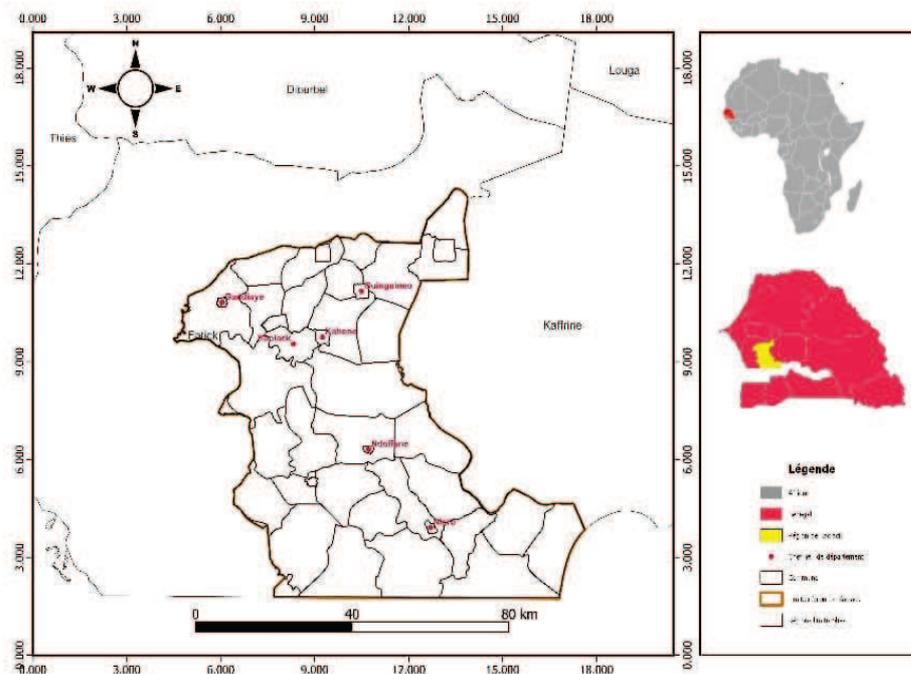


Figure1 : localisation de la zone d'étude

*Données climatiques*

Dans le cadre de cette étude, les données sont des séries de précipitations et de températures journalières de la station de Kaolack allant de 1980 à 2015. Elles proviennent de la base de données de l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA). De même des données relatives aux précipitations annuelles couvrant la période de 1960 à 2013 et issues de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) sont utilisées.

**Méthodologie :**

*Indice Standardisé de précipitation (SPI) :*

Pour déterminer la sévérité de la sécheresse en différentes classes (Tableau 1), l'indice standardisé de précipitation (SPI) a été mis au point par [15]. Cet indice permet d'estimer le déficit pluviométrique pour des échelles de temps différentes afin de mieux apprécier l'effet de la sécheresse sur la disponibilité des ressources en eau. Il est basé sur des calculs statistiques des précipitations pendant une longue période (30 ans au moins) et indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à -1,0 et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive [16]. Dans la même veine, l'indice SPI permet de déterminer l'écart des précipitations d'une période, le déficit ou le surplus par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cette période est variable le plus souvent et va de 3 mois à 2 ans, selon le type de sécheresse que l'on désire suivre. A titre d'exemple, l'indice SPI3 (SPI sur 3 mois compare le volume des précipitations sur la période de trois mois examinés et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés.

En plus l'indice SPI sur 3 mois renseigne sur les conditions d'humidité à courte et moyenne termes et une estimation des précipitations sur une saison.

L'indice standardisé de précipitation établi par l'Equation 1 :

$$SPI = (Pi - Pm) / \sigma \quad (1)$$

où  $P_i$  est la pluie annuelle (en mm) et  $P_m$  la pluie moyenne de la série pour la période de 1960-2013 tandis que  $\sigma$  traduit l'écart-type de la série. Ainsi, le degré de sévérité de la sécheresse pour chaque année est résumé dans le tableau 1.

Tableau 1 : classification des valeurs de SPI

2.0 et plus	Extrêmement humide
De 1.5 à 1.99	Très humide
De 1.0 à 1.49	Modérément humide
De -0.99 à 0.99	Proche de la normale
De -1.0 à -1.49	Modérément sec
De -1.5 à -1.99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

*Les indices climatiques extrêmes*

Les indices climatiques extrêmes utilisés dans ce travail sont définis par l'OMM dans le cadre du "CC/CLIVAR Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI)". La chronique d'étude (2001-2015) permet de mettre en exergue les tendances climatiques récentes obtenues par le truchement du logiciel RClimDex, développé en différentes étapes par [17-18]. L'usage des indices climatiques facilite la description de l'état du changement climatique et établit une analyse et une comparaison des séries temporelles, des extrêmes et tendances. Il existe 16 indices liés à la température et 11 aux précipitations, issus des températures maximales et minimales et aux précipitations.

Dans cet article, nous nous sommes intéressés aux indices d'intensité (TXx et TXn) et aux indices de durée qui sont des périodes de chaleur ou de froid ou d'humidité ou de sécheresse excessive, ou de longueur de la saison de pluies et des périodes de douceur:

Séquences froides (CSDI)

– Séquences chaudes (WSDI)

– Séquences de jours secs consécutifs (CDD)

– Séquences de jours de pluie consécutifs (CWD)

Les identités, les noms et les définitions de ces indices sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Indices des extrêmes des précipitations et des températures journalières

1 2 : Indices des extrêmes des précipitations et des températures journalières Identification	Nom de l'indice	Définition	Unité
Précipitations			
CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières $\geq 1$ mm	jours
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières $< 1$ mm	jours
Températures			
WSDI	Nombre des durées des séquences chaudes	Nombre de jours dans l'année avec au moins 90 jours consécutifs où $T_{max} > 90^{\circ}C$	%jours
CSDI	Nombre des durées des séquences fraîches	Nombre de jours dans l'année avec au moins 10 jours consécutifs où $T_{min} < 10^{\circ}C$	%jours
TXx	Maximum des $T_{max}$	Température maximale la plus élevée de l'année	$^{\circ}C$
TXn	Minimum des $T_{max}$	Température maximale la plus basse de l'année	$^{\circ}C$

Les paramètres d'entrée de RCLimDex sont:

- la première et la dernière année de la période de base;
- la latitude de la station
- le seuil haut et bas des précipitations journalières P (mm)
- le maximum et le minimum de la température maximale journalière ; et le maximum et le minimum de la température minimale journalière. Enfin, les données de sortie sont stockées sous forme de fichiers Excel et de fichiers JPEG pour les graphiques.

#### Modélisation à 3D

Le logiciel de statistiques 'R', version 3.1.2 (2014-10-31), téléchargeable gratuitement sur le site <http://www.r-project.org> a permis la visualisation à 3 dimensions de la spatialisation des pluies. En plus, il a été appliqué dans ce travail un package de R (ismev) proposé par Coles, Bawa, Trenner, et Dorazio (2001) dans lequel les fonctions sont écrites en langage S: <https://cran.rproject.org/web/packages/ismev/ismev.pdf>.

Analyse fréquentielle des précipitations maximales journalières

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future [19].

But de l'analyse

L'objectif de cette analyse est de caractériser l'évolution des extrêmes pluviométriques en 35 ans afin de définir les probabilités d'occurrence dans la station de Kaolack.

Technique de traitement des données

L'analyse fréquentielle demeure l'un des outils pour estimer l'ampleur de l'évènement  $x_T$  auquel est associé une période de retour T (quantile de période de retour ou de probabilité de dépassement  $f = 1/T$ ). L'estimation  $x_T$  de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité P (x ;  $\theta$ ) à un échantillon de n observations avec  $x = \{x_1 \dots x_n\}$  et  $\theta$  symbolise le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité de P. Ainsi, pour déterminer la probabilité d'apparition de ces événements extrêmes (précipitations maximales journalières) un échantillonnage des précipitations journalières est nécessaire pour obtenir les valeurs maximales. La série de données est ensuite soumise à un contrôle de qualité et de représentativité. Pour vérifier la validité des résultats de l'analyse fréquentielle, les données utilisées doivent respecter certaines hypothèses de base. En effet, les données

doivent être indépendantes, homogènes et stationnaires. Ainsi les valeurs maximales des extrêmes pluviométriques ainsi extraites sont soumises au test d'homogénéité de Pettitt [20], de l'ellipse de Bois, de stationnarité de Kendall [21], d'indépendance par l'analyse des autocorrélogrammes, le test de corrélation des rangs de Kendall [22].

Choix du modèle fréquentiel

Les lois statistiques susceptibles d'être utilisées pour l'analyse fréquentielle sont multiples et variées. Dans le cadre de cet article qui s'intéresse aux événements rares comme les extrêmes pluviométriques, le choix est porté sur la théorie des valeurs extrêmes [23]. Ce modèle comporte trois distributions (Gumbel, Fréchet, Weibull) en un seul paramétrage. Si  $X$  désigne la variable symbolisant la précipitation maximale journalière alors sa fonction de distribution est estimée selon l'Equation 2 :

$$P(x|\mu, \sigma, \xi) = \exp \left[ - \left( 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right] \quad (2)$$

Les paramètres dont dépendent cette loi sont :

- $\mu$ : paramètre de position ou de localisation
- $\sigma$ : paramètre d'échelle ( $\sigma > 0$ )
- $\xi$ : paramètre de forme

Une extrapolation du comportement de la queue de distribution des données maximales peut être effectuée grâce à la loi des valeurs extrêmes.

## Résultats et discussion

### Résultats des indices standardisés de précipitation

L'analyse de l'évolution de l'indice pluviométrique standardisé de la station de Kaolack (Figure 2) laisse apparaître une alternance de séquences sèches et humides pour toutes les échelles de temps. Toutefois ces séquences sont plus prononcées à moyen terme (12 mois) et à long terme (24 mois). A court terme (3mois et 6mois), l'indice pluviométrique standardisé illustre des fréquences de sécheresse extrêmement sévères très faibles (0.3%) et une prédominance des période modérément humides (6%) et modérément sèches (6%) de manière continue sur la période d'étude (Fig. 2a et Fig. 2b). Ceci semble paradoxale au regard des autres échelles de temps. Ainsi, l'échelle à court terme n'est pas appropriée pour quantifier la sécheresse. Par ailleurs, l'étude de cet indice (ISP) à moyen et long terme indique cinq périodes qui s'alternent (Fig.2c et Fig.2d). Il peut être noté une période humide de 1960 à 1967 suivie d'une période sèche de 1967 à 1980 puis d'une autre période humide allant de 1980 à 1993. Enfin, respectivement une période sèche et une période humide sont notées de 1993 à 2007 et de 2007 à 2013. Pour le long terme (24 mois), les années modérément sèches se situent de 1993 à 1999 puis de 2004 à 2006. La sécheresse débute en 1967 pour toutes les échelles de temps et dont l'extrême sévérité apparait en 1972 avec un pic inférieur à -2. En effet, cette baisse des précipitations a été déjà souligné dans plusieurs travaux notamment ceux de [24] pour des échelles de temps 5ans, 25 ans et 50 ans au Sénégal. Cependant la fin des années 2000 coïncide avec une augmentation du volume des précipitations dans tous les échelles de temps. C'est pourquoi le début de la décennie 2000 est caractérisé par un regain des conditions humides et une variabilité des précipitations [25].

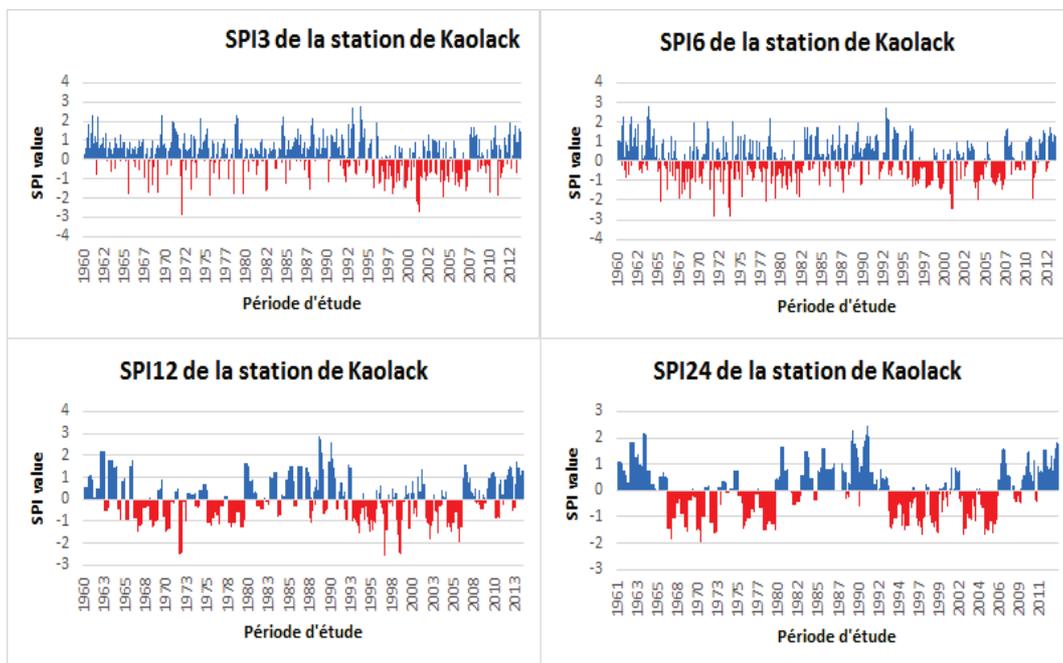


Figure 2 : Indice Standardisé des Précipitations de la station de Kaolack à différentes échelles de temps

### Résultats des indices extrêmes climatiques :

*Indices des jours pluvieux consécutifs (CWD) et des jours consécutivement secs (CDD)*

La variation des jours secs consécutifs (CDD) et des jours consécutivement pluvieux (CWD) à la station de Kaolack est représentée à la Figure 3. Les résultats indiquent une période marquée par une persistance du nombre de jours secs plus accentuée en 1987 et en 1992 (Fig.3a). D'ailleurs, la tendance à la hausse du nombre de jours secs consécutifs est accompagnée par des fluctuations records de 290 jours.

Par contre les jours pluvieux consécutifs enregistrent une tendance à la baisse pour la chronique d'étude (1980-2015) (Fig.3b). En outre la courbe de lissage relative aux jours pluvieux consécutifs montre deux phases d'évolution. De plus, l'année 1996 représente le plus faible nombre de jours de pluies (CWD= 2 jours) et l'année 1988 affiche la plus grande valeur du nombre de jours pluvieux (CWD = 10 jours) pour la station de Kaolack. La période allant de 1980 à 1992 qui est marquée par une légère hausse du nombre de jours pluvieux consécutifs puis celle de 1992-2015 caractérisée par une baisse importante. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de [26] portant sur la période de 1950 à 2018 dans le bassin du fleuve Sénégal où la sécheresse est traduite par une baisse considérable du nombre de jours pluvieux et d'une diminution des précipitations supérieure à 50mm. Ainsi, cela atteste d'un allongement de la saison sèche et d'un rétrécissement de la saison des pluies dans la station de Kaolack depuis le début des années 1980.

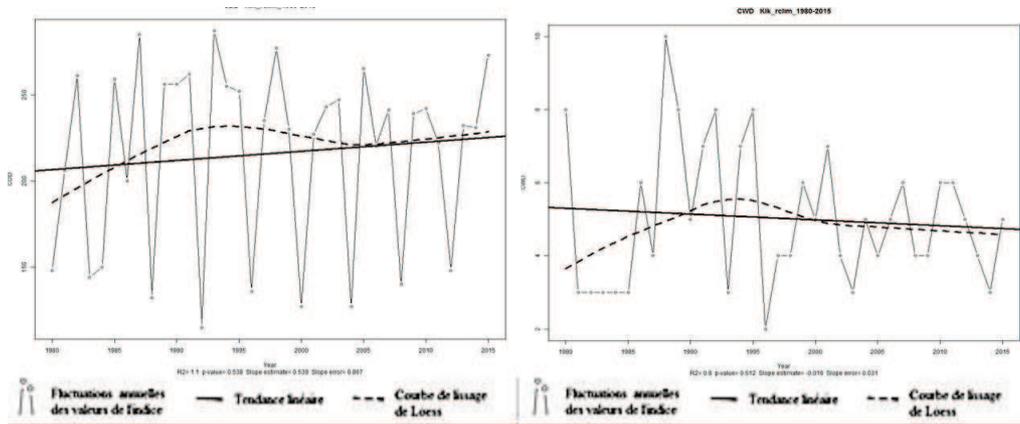


Figure 3 : Evolution annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices climatiques (CDD et CWD)

*Indice des durées des séquences fraîches (CSDI) et des séquences chaudes (WSDI)*

L'évolution des indices des durées des séquences fraîches (CSDI) et des séquences chaudes (WSDI) dans la station de Kaolack sont représentées à la Figure 4. Une baisse du nombre de jours frais (0.118%/an) qui s'est accentuée depuis 1982 (Fig. 4b) est enregistrée. En revanche, le nombre de jours chauds (Fig. 4a) est en augmentation (0.083%/an) et est plus important en 1997. Ces résultats concordent avec ceux obtenus précédemment. Le réchauffement climatique dans la station de Kaolack se traduit globalement par une réduction des séquences fraîches et une augmentation des séquences chaudes qui provoquent une diminution de la pluviométrie. Il en résulte que le climat est plus tempéré que durant les décennies 1970 et 1980 où sévissait les sécheresses extrêmes.

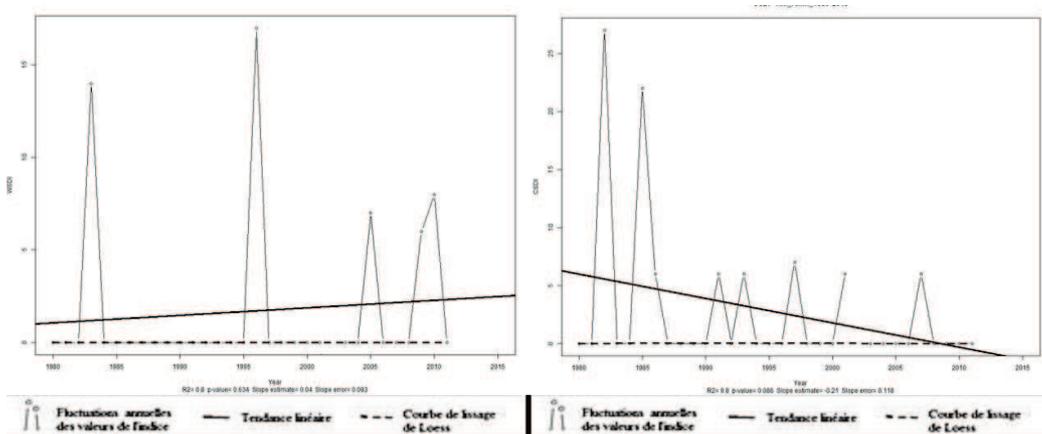


Figure 4 : Evolution annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices climatiques (WSDI et CSDI)

*Indices de la température maximale la plus élevée dans l'année (TXx) et de la température maximale la plus basse dans l'année (TXn)*

La Figure 5 montre l'évolution des indices annuels des extrêmes de températures (TXx et TXn). La période d'étude est marquée par une tendance à la hausse de la température maximale la plus élevée et la plus basse. Cette évolution est conforme à la situation mondiale déjà notée par [27]. Un maximum des températures maximales (TXx) égale à 48°C est enregistré en 1982. Parallèlement, le minimum des températures maximales a pour sa part connu une baisse significative à partir de 1982 puis une hausse importante dès 1985. De surcroît, il convient de remarquer que l'augmentation des extrêmes températures entraînent une diminution des séquences fraîches, ce qui confirme la hausse du nombre de jours chauds.

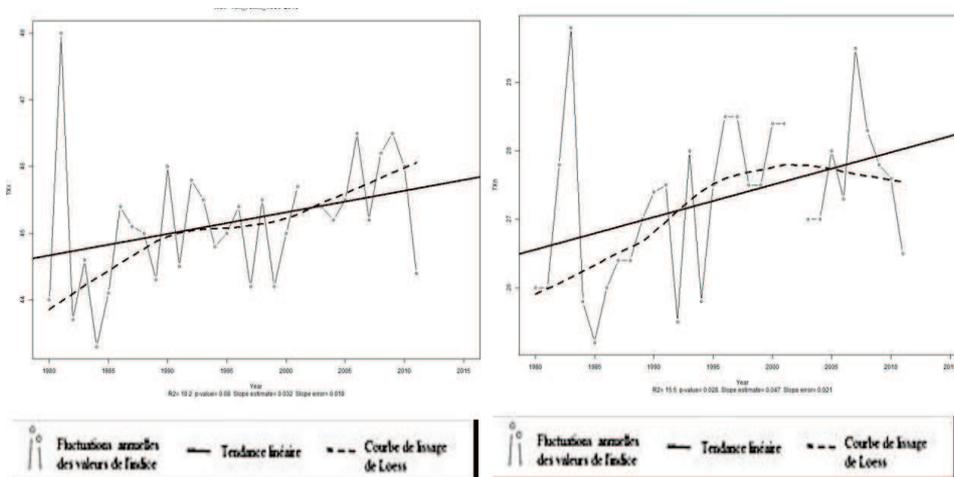


Figure 5 : Evolution annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices climatiques (TXx et TXn)

*Synthèse de l'évolution des tendances des indices climatiques extrêmes*

L'évolution de tous les taux des tendances des indices climatiques extrêmes de la période de 1980 à 2015 est synthétisée graphiquement à la Figure 6. Celle-ci atteste que les tendances à la hausse dominent dans l'évolution des indices climatiques extrêmes plus précisément pour les températures. Par ailleurs, les tendances à la baisse ne sont pas assez fréquentes, environ moins de 25% en CSDI et moins de 2% en CWD. Le pourcentage de tendance à la hausse est observé quasiment trois fois plus que celui des tendances à la baisse dans les indices climatiques extrêmes. Le pourcentage le plus élevé de tendance à la hausse concerne CDD, soit 54%.

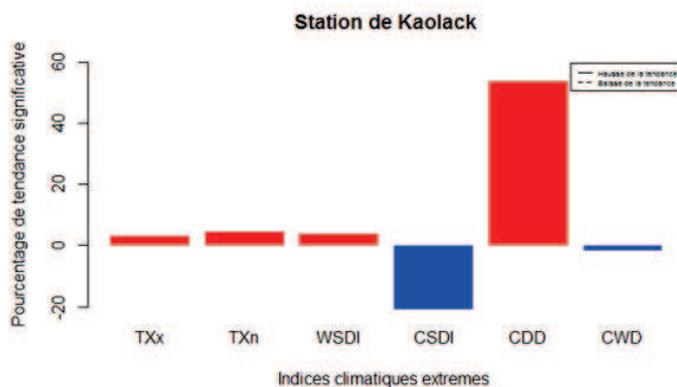


Figure 6 : Représentation récapitulative des tendances dans les indices climatiques extrêmes

*Evolution des précipitations maximales à l'échelle mensuelle de 2001 à 2015*

De l'analyse de la répartition spatio-temporelle des précipitations maximales à l'échelle mensuelle (Figure 7), il résulte que la saison des pluies s'étend de juin à septembre avec un pic aux mois d'août et septembre. Ce comportement climatique est fréquent dans les régions soudano-sahéliennes. De plus, l'évolution des précipitations entre 2001 et 2008 montre une hausse de volume de 8% au mois d'août suivie d'une baisse de 18% au mois de

septembre. Par contre, une inversion de tendance semble se dessiner pour le second septennat (2008-2015). En effet, plus de la moitié des pluies (51%) est mesurée au mois de septembre avec un début de plus en plus tardif de la période hivernale (juillet). Ces résultats vont en droite ligne avec les études de [28]. Selon eux, les données satellitaires indiquent que le début tardif de l'hivernage dans la zone soudano-sahélienne se situe entre le 19 juin et 29 juillet avec une forte variabilité interannuelle.

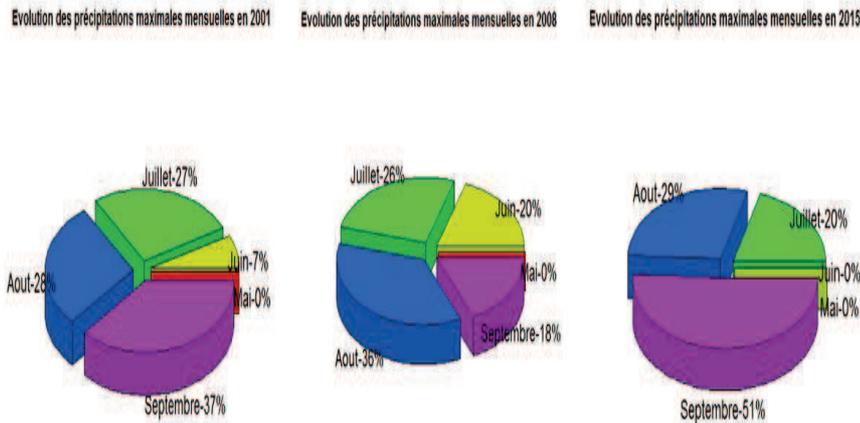


Figure 7 : Répartition des précipitations maximales mensuelles par septennat de 2001 à 2015

*Modélisation à 3Dimensions de la variation de la température en fonction de la spatialisation des précipitations journalières de la station de Kaolack*

Une modélisation à 3D pour les deux derniers septennats de la chronique d'étude (1980-2015) est utilisée pour analyser l'évolution des températures journalières et leur influence sur la répartition spatiotemporelle des précipitations à l'échelle journalière.

A la lumière des résultats présentés à la Figure 8, il ressort que pour des périodes de fortes chaleurs comprises entre 35°C et 40°C, la hauteur des pluies ne dépasse pas 40 mm en 2001. De même, pour des températures élevées situées entre 30°C et 35°C en 2008 puis de 30°C à 38°C en 2015, il apparaît une forte concentration des précipitations du mois de juillet au mois septembre variant respectivement d'une hauteur de 50mm à une hauteur de 60mm. En plus, pour des températures supérieures à 40°C, les précipitations sont localisées le plus souvent entre le 5ème et 6ème mois et ne vont pas au-delà de 10mm. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de [29]. Selon ces derniers, les modifications de température du Sud de l'Océan atlantique et de l'Océan Indien et de la surface des eaux du Nord ou parfois les anomalies de température de surface de l'Océan Pacifique liées au phénomène d'El Nino, seraient à l'origine des changements dans l'activité de la mousson ouest-africaine. En sus, il est intéressant de souligner que les fortes périodes de chaleurs impactent sur la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie. D'ailleurs, les résultats de [30] abondent dans la même logique. Selon eux les paramètres atmosphériques comme la température et l'humidité relative de l'air influencent fortement la distribution spatiotemporelle de la pluviométrie dans le haut bassin du fleuve Sénégal.

Années	Station de Kaolack
--------	--------------------

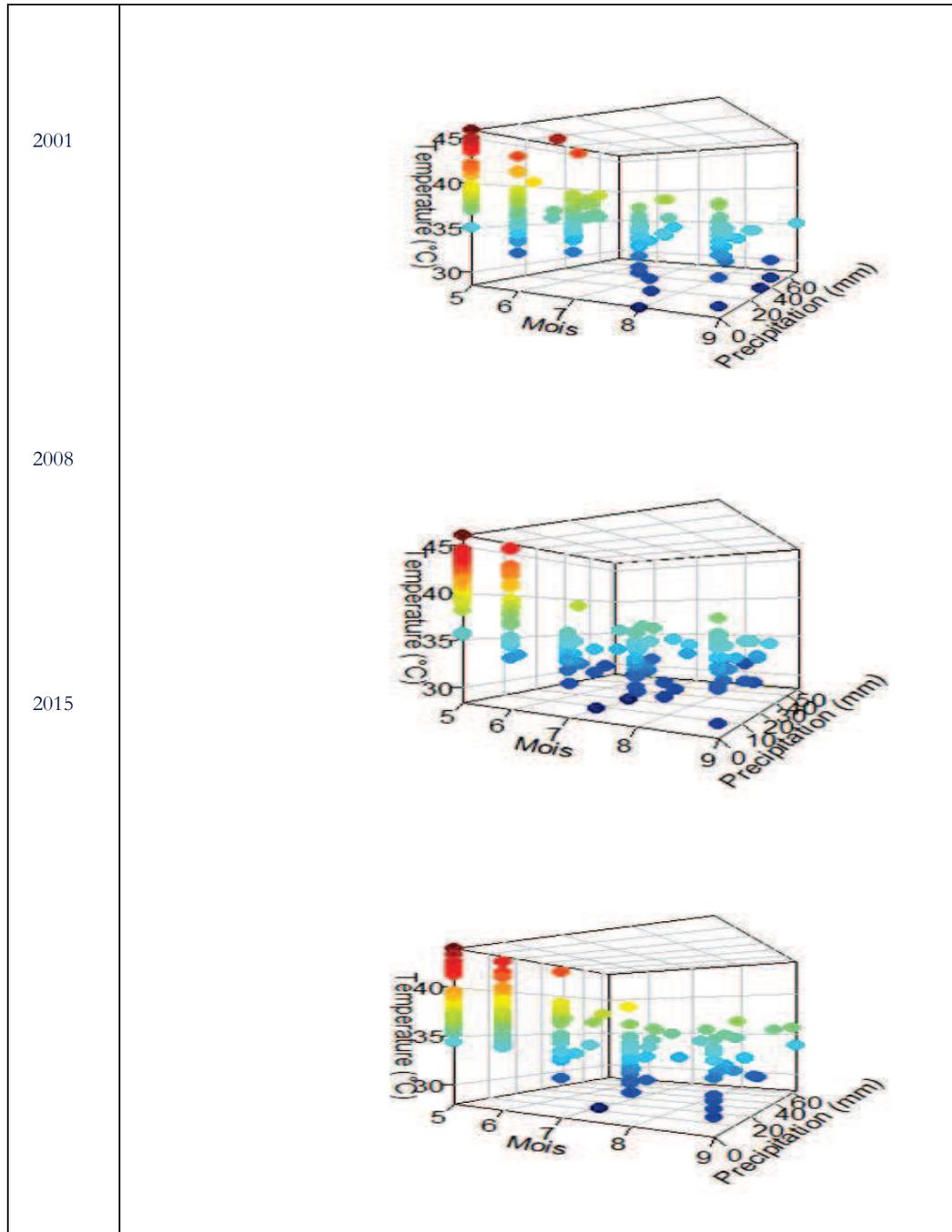


Figure 8 : visualisation à 3D de la précipitation journalière et de la température de la station de Kaolack

Analyse fréquentielle des hauteurs de pluies maximales dans la station de Kaolack

L'application de l'analyse fréquentielle supposera la validation des hypothèses de base et l'ajustement par la loi GEV.

Vérification des hypothèses de bases de l'analyse fréquentielle des températures maximales journalières

L'analyse de l'autocorrélogramme au niveau de signification  $\alpha = 0.05$  fait ressortir des points figuratifs à l'intérieur de tous les intervalles de confiance, ce qui permet d'illustrer le caractère indépendant de la série (Fig. 9c). Dans la même lancée, les résultats du test de corrélation des rangs indiquent que l'hypothèse nulle ( $H_0$  : la série est aléatoire) est acceptée à tous les seuils de confiance. Cependant, les résidus et l'ellipse de Bois montrent que l'hypothèse nulle ( $H_0$  : la série est homogène) est acceptée pour la station de Kaolack (Fig. 9d). En effet, tous les points figuratifs se trouvent à l'intérieur de l'ellipse. Ces résultats sont confirmés par la tendance linéaire de l'évolution interannuelle des précipitations maximales journalières (Fig. 9a). Par ailleurs, le test de Segmentation de la série à l'ordre 1 (Fig. 9b) met en évidence une stationnarité de la moyenne pour la période d'étude, ce qui caractérise davantage l'homogénéité de la série de pluies maximales journalières. De plus, les résultats du test de Mann Kendall confirment une absence de tendance significative (Tableau 3) à Kaolack. En sus, les précipitations maximales journalières à Kaolack sont indépendantes, homogènes et stationnaires, par voie de conséquence elles peuvent faire l'objet d'un ajustement par la loi GEV.

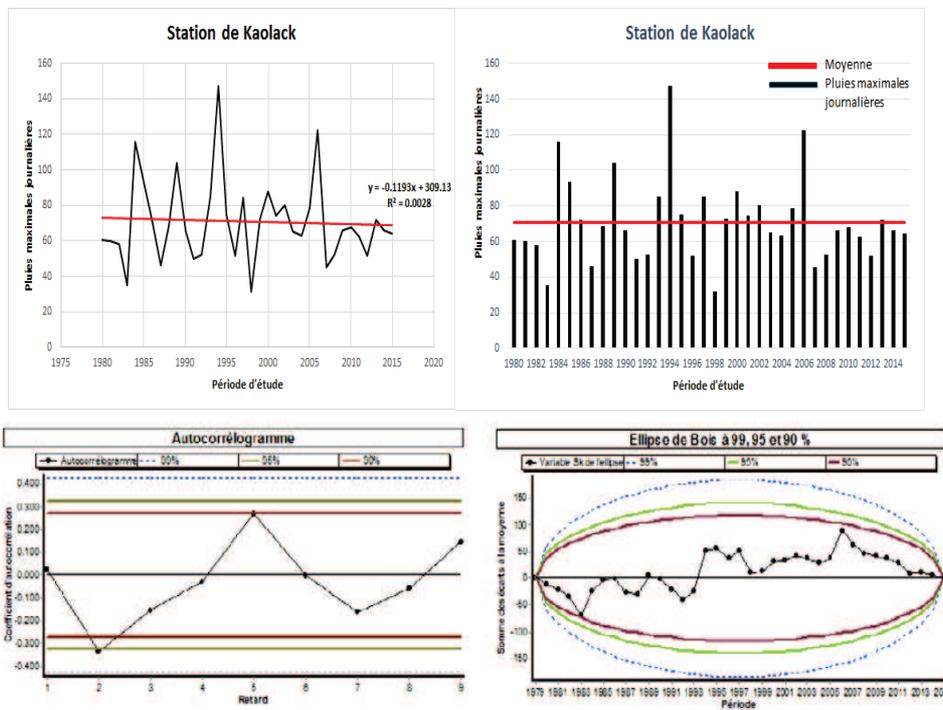


Figure 9 : a. évolution interannuelle des pluies maximales journalières  
c. Autocorrélogramme des pluies maximales

b. Test de Segmentation de Hubert  
d. Test de cumul des résidus : ellipse de Bois

Tableau 3 : résultat du test de Mann Kendall pour l'ajustement des pluies maximales journalières

*Ibrahimia Touré et al., /IJWSET-JISTEE, Vol. (viii), Issue 1, Mars 2023, pp. 85-99*

Pluie maximale journalière (mm)	Test de Mann Kendall	
	Valeur de la statistique	P-value
Loi GEV	-0.27244	0.7853

Simulation des événements pluviométriques extrêmes et leurs niveaux de retour par la loi GEV  
 La Figure 10 illustre un bon ajustement graphique de la série pluviométrique maximale journalière par la loi de distribution GEV sur la période d'étude 1980-2015 dans la station de Kaolack. Cela se matérialise respectivement par l'estimation du modèle empirique (Fig. 10a) et la bonne approximation des quantiles (Fig. 10b). De toute évidence, la loi de distribution GEV de type Frechet ( $\xi > 0$ ) s'avère appropriée pour modéliser les événements pluviométriques extrêmes. Dans cette logique, il importe de remarquer que la représentation graphique de l'histogramme des précipitations (Fig. 10d) corrobore ce bon ajustement avec des événements extrêmes variés. Il y est noté six événements extrêmes dans la queue de distribution dont deux à gauche et quatre à droite. En outre, l'ajustement des pluies maximales journalières par la loi GEV et par la méthode de maximum de vraisemblance indique que ces données de précipitations suivent de près ce modèle avec une probabilité de non dépassement de 95% (Fig. 10c). Ainsi, la simulation des périodes de retour est plus concrète entre 1 et 10 ans dans les données observées. Néanmoins des niveaux de retour d'une rareté extrême sont enregistrés entre 10 et 80 ans (Tableau 4). Ces résultats sont en accord avec les travaux de [31]. Ceux-ci confirment des événements pluvieux très normal (123mm) et exceptionnels (152mm) avec respectivement des périodes de retour (10ans) et (30ans) dans la zone de Kaolack. Le léger contraste qui subsiste avec les valeurs trouvées dans ce travail pourrait provenir de la différence des périodes d'étude.

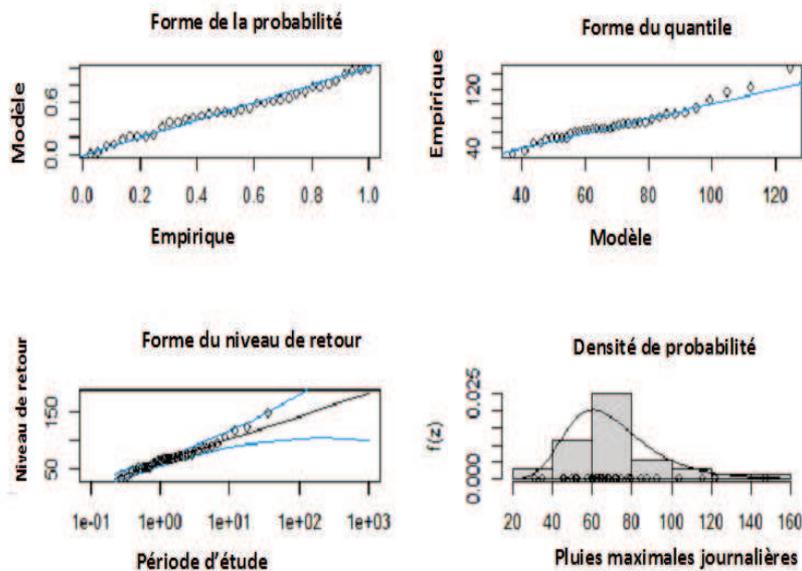


Figure 10 : (a) Ajustement de la loi GEV par voie empirique et (b) simulation des quantiles. (c) les niveaux de retour et (d) la densité de probabilité sont aussi ajustés.

Tableau 4 : Estimations des périodes de retour des pluies maximales journalières et leur intervalle de confiance

Mode de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans
Kaolack	67.1 [59.9 – 74.3]	87.5 [77 – 97.9]	0.9 [86.6 – 115.1]	3.7 [93.9 – 133.4]	0.9 [97.2 – 144.7]	00.4

**CONCLUSION :**

Cette étude a permis d'analyser l'impact de la variabilité climatique par le biais des indices de température et de précipitation sur les ressources en eau dans la région de Kaolack au Sénégal. Les résultats de l'étude montrent dans un premier temps une alternance de périodes modérément sèches et humides. En réalité, le réchauffement dans la station de Kaolack se traduit par une augmentation de la température maximale la plus élevée et la plus basse dans l'année. Cette hausse est aussi tributaire à celles des séquences de jours secs consécutifs et des séquences de jours chauds. D'ailleurs ces augmentations sont concomitantes à la baisse de la fréquence des séquences fraîches et au nombre consécutifs de jours pluvieux. En définitive la baisse des pluies et l'augmentation des températures ont engendré une diminution des ressources en eau à Kaolack. En second lieu, l'application d'une modélisation à 3 dimensions a permis d'établir une corrélation entre les périodes de fortes chaleurs et la répartition spatio-temporelle des précipitations journalières durant la période hivernale. Enfin les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes obtenues par la loi généralisée des valeurs extrêmes (G.E.V) sont plus prononcées entre 1 et 10 ans. Par ailleurs, les événements extrêmement rares se situent entre 10 et 80 ans.

### Références

1. GIEC (2021). Résumé pour les décideurs, Encadré 1. La période préindustrielle par rapport à laquelle les changements de température sont mesurés est délimitée de 1850 à 1900.
2. Rapport Mondial sur le déplacement interne (IDMC), publié en avril 2020, 136p <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2020/french.html> (consultation le 12 septembre 2022)
3. Rapport « État du climat en Afrique 2021 », Organisation Météorologique Mondiale (OMM), publié le 8 septembre 2021 à Maputo (consultation le 12 septembre 2022)
4. I. TOURE, D. M. NDIONE, I. LEYE, M. H. A. SAMBOU et M. L. SANE, Analyse des tendances dans les séries pluviométriques au Sénégal, revue Afrique SCIENCE 21(1) (2022) 122 – 135p.
5. D.M. NDIONE, S. SAMBOU, M.L. Sane, S. Kane, I. LEYE, S. TAMBA, M.T. CISSE, Statistical analysis for assessing randomness, shift and trend in rainfall time series under climate variability and change: case of Senegal. Journal of Geoscience and Environmental Protection, 5 (2017) 31- 53p. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.513003>.
6. A. KOUASSI, R.-K. NASSA, K. KOUAKOU, K. KOUAME, & J. BIEMI, Analyse des impacts des changements climatiques sur les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science, 32(3) (2019) 207–220p. <https://doi.org/10.7202/1067305ar>
7. P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, M. SANON, P. YAKA et L. SOME, Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. Climatologie, vol. 14, (2017) 82-95p.
8. M. SARR, M. A. MOUSSA, E. H. DEME et B. DIOP, Trend and Return Level Analysis of Extreme Rainfalls in Senegal. Journal of Water Resource and Protection, 14 (2022) 221-237p.
9. M. A. Sarr, O. Seidou, Y. Trambly and S. E. Adlouni, Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal, Journal of Hydrology-Regional Studies, 4 (2015) 369–85p.
10. F. HALLOUZ, M. MEDDI, G. MAHE, H. KARAHACANE et S. E. A. RAHMANI, Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'Oued Mina en Algérie, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 32(2) (2019) 83–114p.
11. K.N.D ATCHEREMI, J. P. R. JOURDA, M. B. SALEY, K. J. KOUAME, T. R. BALLIET, Etude de l'évolution des extrêmes pluviométriques et de température dans le bassin versant de Rivière DAVO (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) à partir de certains indices du logiciel Rclimdex, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°36, Dec 2018, 99-117p.
12. A. BEDOUM, C. B. BIONA, B. J. PIERRE, I. ADOUM, R. MBIKAKE & L. BAOHOUTOU, Évolution des indices des extrêmes climatiques en République du Tchad de 1960 à 2008, Atmosphere-Ocean, 55(1) (2017) 42-56p.
13. K.I. N'DRI and S. NADARAJAH, Statistical modeling of monthly maximum temperature in Senegal, Environmental Research Communication, 4 (2022) 075002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac7bda>
14. F. MUTHONI, Spatial-Temporal Trends of Rainfall, Maximum and Minimum Temperatures Over West Africa, IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, vol. 13, (2020) 14p.

15. McKee TB, Doesken NJ, Kliest J, (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales, Colorado Climate Center Department of Atmospheric Science Colorado State University Fort Collins, pp 43-50, Colorado.
16. WMO, Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations, Organisation météorologique mondiale (OMM), (2012) 15-25 p.
17. P. FRICH, L. V. ALEXANDER, P. D. MARTA, B. GLEASON, M. HAYLOCK, A. M. G. TANK,
18. & T. PETERSON. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), (2002) 193–212.
19. X. Zhang et F. Yang, RClimdex 1.0, User Manual, Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada, (2004) 23 p.
20. [19] B. P. CHABI, Fluctuations Pluviométriques et Analyse Fréquentielle des Hauteurs de Pluie Maximales en Milieu Subéquatorial au Bénin, *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, Vol. 20 No. 2 May (2020) 310-326 p.
21. M. L. SANE, S. SAMBOU, S. DIATTA, I. LEYE, D. M. NDIONE, S. SAUVAGE, J.M. SANCHEZ-PEREZ et S. KANE, Trends and shifts in time series of climate data generated by GCM from 2006 to 2090, *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 10 (5) (2019) 212 ISSN 2229-5518
22. M. LANDING SANE, S. SAMBOU, D. MARIA NDIONE, I. LEYE, S. KANE et M. LAMINE BADJI, Analyse et traitement des séries de débits annuels et mensuels sur le fleuve Sénégal en amont du barrage Manantali : cas des stations de Bafing Makana et Dakka Saidou, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 30 (2017) 102 - 120 p.
23. S. SAMBOU & E. N. M. NIMY, Critique statistique des séries des pluies annuelles dans le bassin amont du Fleuve Sénégal, *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, IAHS Publ. 308 (11) (2006) 319-324p.*
24. [23] P. EMBRECHTS, C. KLÜPPELBERG and T. MIKOSCH, *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance* (Berlin: Springer), 1997.
25. Faye, A. Ndiaye, I. Mbaye, Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaine climatiques au Sénégal. *J. Wat. Env. Sci. Vol. 1, N°1, (2017) 11-28p.*
26. Z. NOUACEUR, La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne, *J. Open Edition-Géographie physique et environnement*, Vol. 5, (2020), 19p.
27. A. BODIAN, H. DACOSTA et A. DEZETTER, Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique, *Physio-Géo-Géographie Physique et Environnement*, vol.5, (2011), 116-133p.
28. SEBBAR, H. FOUGRACH, M. HSAIN et W. BADRI, Etude des variations climatiques de la région Centre du Maroc. Actes du colloque de l'Association internationale de climatologie, 5-8 septembre 2012, Grenoble, France, Vol. 1, (2012) 709-714p.
29. CAMARA, M. NOBLET, Q. LEJEUNE, Y. SANÉ, Évaluation de la variabilité climatique et des tendances climatiques futures dans la région de Fatick - Sénégal, Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin, (2019) 1 - 34 p.
30. C.K. Folland, T.N. Palmer and D.E. Parker, Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985. *Nature*, 320 (1986) 602-607p.
31. FATY, A. KANE, & A. L. NDIAYE, Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 30(2) (2017) 79–87. <https://doi.org/10.7202/1042915ar>
32. S. SENE et P. OZER, Evolution pluviométrique et relations inondations-événements pluvieux au Sénégal, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 42 (2002) 27-33p.