

## **Changements climatiques : recherche des signaux au Tchad à travers l'étude des villes de Bol, Fianga, Moundou et N'Djamena**

*Semingar Ngaryamngaye*

Texila American University, Georgetown, Guyana, South America

*Franklin Bouba Djourdebbe*

Institut de Formation et de Recherche Démographiques (IFORD),  
Université de Yaoundé II, Cameroon

[Doi: 10.19044/esipreprint.5.2024.p147](https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2024.p147)

Approved: 05 May 2024  
Posted: 10 May 2024

Copyright 2024 Author(s)  
Under Creative Commons CC-BY 4.0  
OPEN ACCESS

*Cite As:*

Ngaryamngaye S., Djourdebbe F.B. & Miambaye M. (2024). *Changements climatiques : recherche des signaux au Tchad à travers l'étude des villes de Bol, Fianga, Moundou et N'Djamena*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2024.p147>

### **Resumé**

Le changement climatique, caractérisé par des événements météorologiques extrêmes, est considéré comme l'une des menaces les plus sérieuses pour le développement durable, avec des effets néfastes attendus sur la santé humaine et la sécurité alimentaire. Avec plus de la moitié de sa superficie aride, le Tchad est plus menacé que jamais par ces événements météorologiques extrêmes de plus en plus fréquents. Cela affaiblit son économie et affecte la santé de sa population. Basé sur des données d'observation des stations dans la zone d'étude (Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména), cet article vise à mettre en évidence les signaux du changement climatique au Tchad. À cette fin, une analyse de l'évolution des précipitations annuelles et des températures a été menée avant et après la rupture détectée en utilisant des tests statistiques, ainsi qu'une analyse de tendance et de variabilité des indices de précipitations et de températures extrêmes. Notamment, les résultats de l'étude montrent une tendance générale à la baisse des précipitations, malgré une variabilité croissante au cours des décennies 2010 et 2020, et une augmentation statistiquement significative des températures. Les résultats de l'étude contribuent ainsi aux efforts de modélisation pour mieux prédire les maladies sensibles au climat

dans le contexte du changement climatique.

---

**Mots-clés :** Changement climatique, tendance, indicateurs, maladies, Tchad

---

## **Climate Change: Searching for Signals in Chad Through the Study of the Cities of Bol, Fianga, Moundou, and N'Djamena**

*Semingar Ngaryamngaye*

Texila American University, Georgetown, Guyana, South America

*Franklin Bouba Djourdebbe*

Institut de Formation et de Recherche Démographiques (IFORD),  
Université de Yaoundé II, Cameroon

---

### **Abstract**

Climate change, characterized by extreme weather events, is considered one of the most serious threats to sustainable development, with adverse effects expected on human health and food security. With more than half of its surface area being arid, Chad is more threatened than ever by these increasingly frequent extreme weather events. This weakens its economy and affects the health of its population. Based on observational data from stations in the study area (Bol, Fianga, Moundou, and N'Djaména), this article aims to highlight the signals of climate change in Chad. To this end, an analysis of the evolution of annual precipitation and temperatures was conducted before and after the detected break using statistical tests, as well as a trend and variability analysis of extreme precipitation and temperature indices. Notably, the results of the study show a general downward trend in precipitation, despite an increasing variability over the decades 2010 and 2020, and a statistically significant increase in temperatures. The study results thus contribute to modeling efforts to better predict climate-sensitive diseases in the context of climate change.

---

**Keywords:** Climate change, trend, indicators, diseases, Chad

### **Introduction**

Le changement climatique est considéré comme l'une des plus grandes menaces pour le développement durable et les moyens de subsistance des populations dans les pays en développement, avec des effets néfastes attendus sur la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources naturelles et les infrastructures (GIEC, 2018). Le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit un réchauffement accéléré de plus de 1,5°C au cours

des prochaines décennies, ce qui dépassera la limite mondiale de réchauffement de 1,5°C.

L'Afrique subsaharienne est la région la plus vulnérable au monde face au changement climatique. L'augmentation des températures, la montée du niveau de la mer et les anomalies des précipitations augmentent la fréquence et l'intensité des catastrophes naturelles telles que les cyclones dévastateurs, l'invasion de criquets en Afrique de l'Est et la désertification au Sahel (Rigaud et al., 2019).

Pays enclavé de l'Afrique subsaharienne, le Tchad couvre une superficie de 1 284 000 km<sup>2</sup> dont plus de la moitié est aride. Il est plus menacé que jamais par les effets négatifs de la variabilité et du changement climatiques, caractérisés par une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, y compris les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur, comme en témoignent les graves inondations des dernières années qui ont causé des dommages matériels et des pertes en vies humaines (MEEP, 2019; OCHA, 2022).

Mettre en évidence ces changements ne peut être réalisé qu'à travers l'analyse des données climatiques à l'échelle locale ou à haute résolution, alors que les études du GIEC sont souvent menées à grande échelle de 2,5° par 2,5°, équivalent à environ 250 km par 250 km (Flato et al., 2013). Une telle résolution ne permet pas d'apprécier l'évolution des paramètres climatiques à l'échelle locale, même si ces dernières années, d'autres études ont été menées à des échelles plus fines, avec une grille de 0,5° par 0,5° (ou 50 km par 50 km), mais encore une fois, cette grille est trop grande pour nos études. Plusieurs études se sont appuyées sur ces données à grande échelle pour des analyses de vulnérabilité localisées, conduisant à des résultats biaisés, d'où la nécessité d'utiliser des données observées pour des résultats optimaux. De plus, la variabilité et les tendances des précipitations et des températures à l'échelle locale sont d'une grande importance pour évaluer leurs impacts sur l'évolution des maladies sensibles au climat et la vulnérabilité de la population (Dazé et al., 2010; OMS, 2015). Cette situation justifie donc la nécessité de mettre en évidence l'évolution des températures et des précipitations, principaux paramètres météorologiques caractéristiques du changement climatique.

L'objectif de cet article est de réaliser une détection localisée du changement climatique dans les stations de Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména en utilisant des indicateurs appropriés. Le travail prolongera l'analyse d'Aguilar et al. (2009) et de Bedoum et al. (2016) sur les indices climatiques extrêmes au Tchad. Pour ce faire, quatre indicateurs majeurs ont été sélectionnés pour l'analyse. Ceux-ci incluent les anomalies (déviation et pourcentage), les indices normalisés, les indices climatiques extrêmes et les tendances des précipitations, des températures maximales et minimales.

## II. Contexte, Données et Méthodes

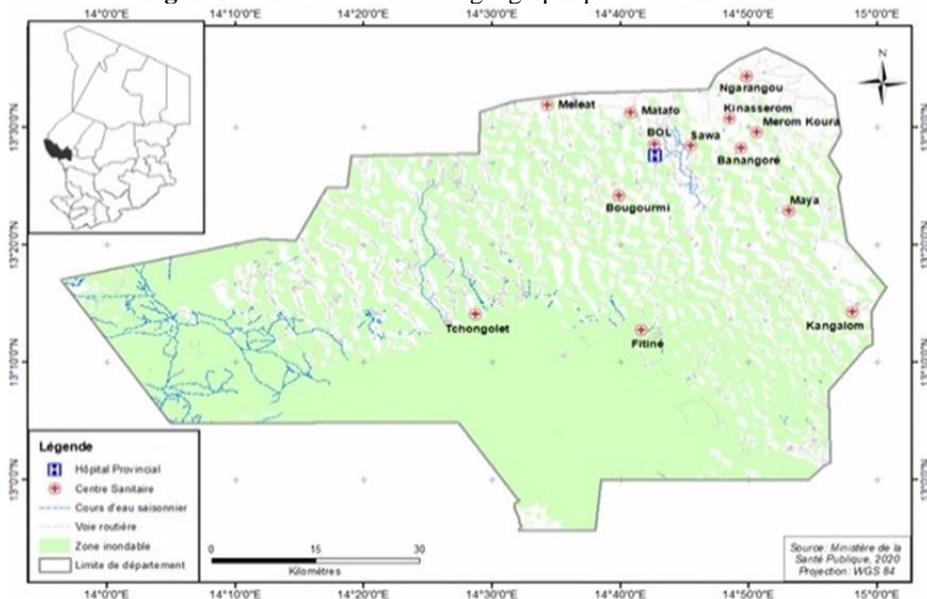
### 2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude comprend quatre (4) villes réparties à travers les zones bioclimatiques du Tchad, incluant deux zones rurales. Ces villes sont Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména. Le critère de sélection est basé sur les situations épidémiologiques antérieures de paludisme et de choléra. Parmi les quatre villes cibles, deux sont considérées comme endémiques et à haut risque, tandis que les deux autres connaissent rarement des épidémies (Yandaï et al., 2017). Moundou et Fianga sont deux villes situées dans la zone soudanaise. Moundou est reconnue comme une zone où le paludisme est endémique, tandis que Fianga est reconnue comme un point chaud pour le choléra. Pour la zone sahéenne, le choix se porte sur N'Djaména, une ville reconnue comme un centre pour les épidémies de paludisme, tandis que Bol est reconnue comme un centre pour les épidémies de choléra. Le choix prend également en compte les différences de conditions socio-économiques entre les zones urbaines et rurales. Une autre raison qui justifie le choix de la zone d'étude est la disponibilité des données climatiques.

#### 2.1.1. Caractéristiques géographiques de la localité de Bol

La ville de Bol est située sur les rives du Lac Tchad, à 153 km au nord de la capitale, dans la zone sahéenne du Tchad, entre  $13^{\circ} 27' 31''$  de latitude Nord et  $14^{\circ} 42' 53''$  de longitude Est. Son climat désertique est sec et chaud. La ville de Bol est la capitale de la province du Lac et du département de Mamdi. Elle compte environ 15 000 habitants.

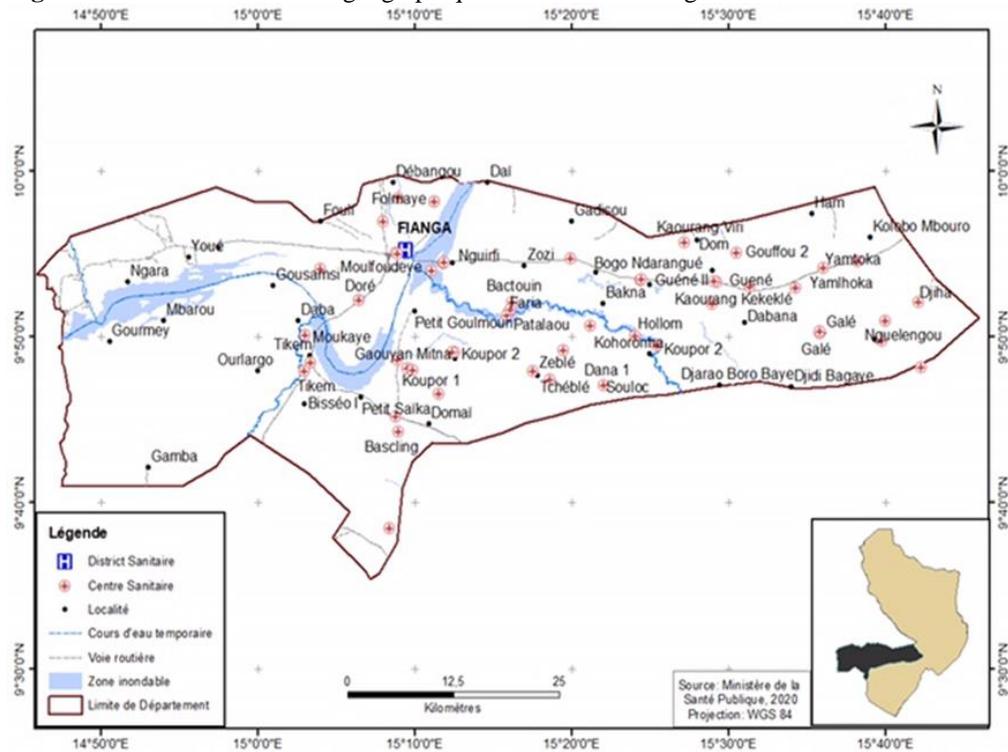
**Figure1:** Carte de localisation géographique de la ville de Bol



### 2.1.2. Caractéristiques géographiques de la localité de Fianga

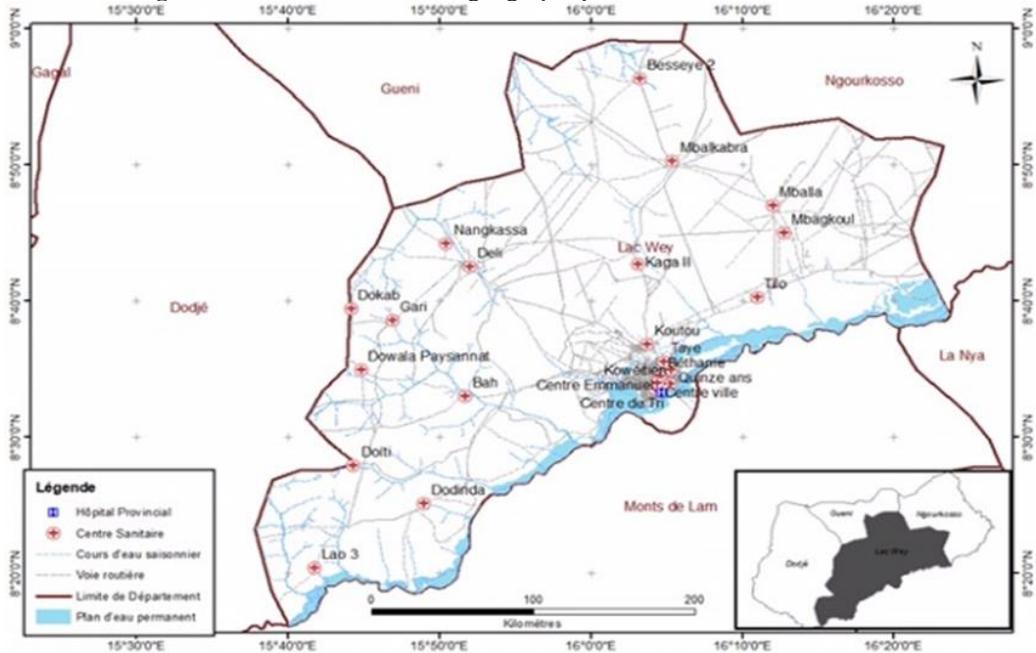
La ville de Fianga est située à environ 8 km du Lac Fianga, à une latitude de  $9^{\circ} 54' 55''$  Nord, une longitude de  $15^{\circ} 8' 15''$  Est, et une altitude de 339 mètres. Fianga bénéficie d'un climat chaud et légèrement humide. Sur l'année, la température moyenne à Fianga est de  $28,9^{\circ}\text{C}$  et les précipitations moyennes sont de 606,9 mm. En tant que capitale du département de Mont Illi dans la province de Mayo-Kebbi Est, Fianga a une population d'environ 17 000 habitants en 2020.

**Figure 2:** Carte de localisation géographique de la ville de Fianga et le nombre des habitants



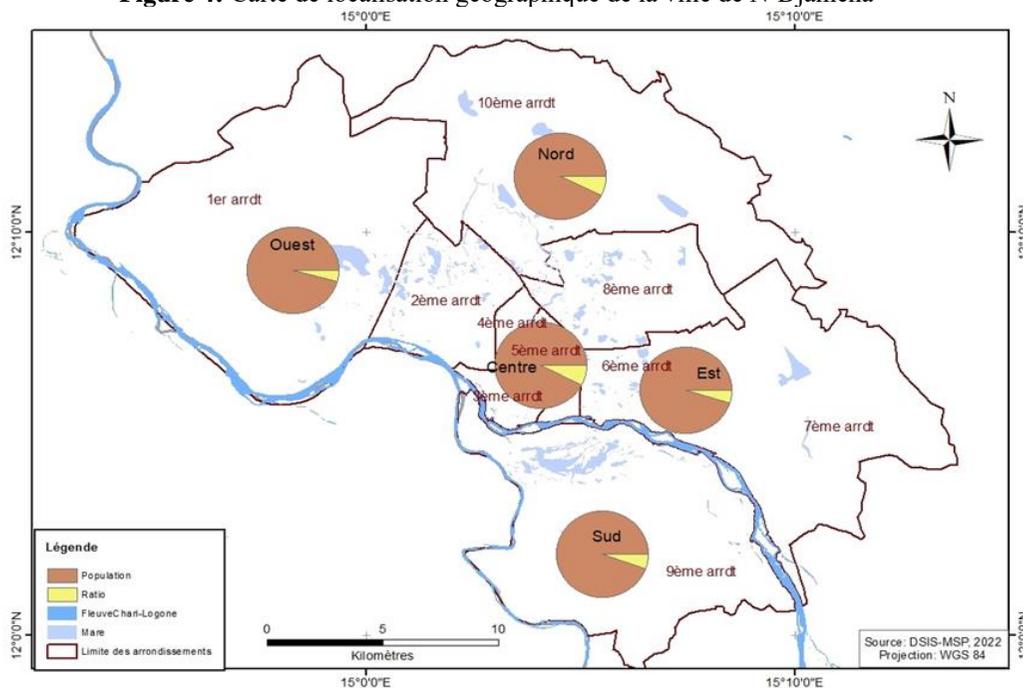
### 2.1.3. Caractéristiques géographiques de la localité de Moundou

Située à une latitude de  $8^{\circ}34'00''$  N, une longitude de  $16^{\circ}04'59''$  E, et une altitude de 401 mètres, Moundou est la deuxième ville et la capitale économique du Tchad. La ville est construite sur la rive gauche du fleuve Logone, près du Lac Wey, ce qui représente une menace d'inondation pour la ville. En tant que capitale de la région du Logone et du département du Lac Wey, Moundou a une population d'environ 200 000 habitants en 2020.

**Figure 3:** Carte de localisation géographique de la ville de Moundou

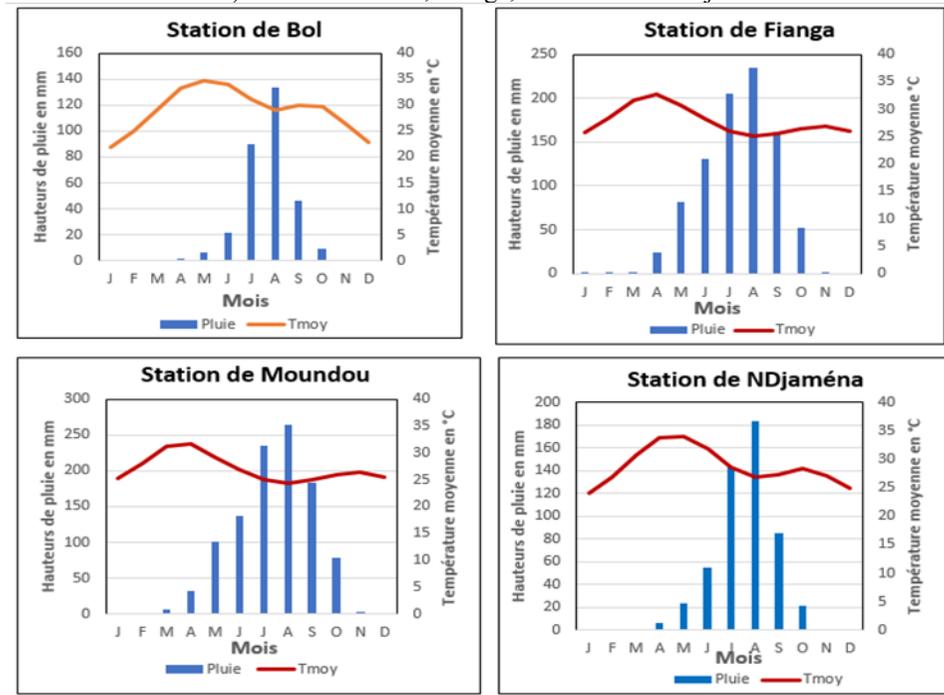
#### 2.1.4. Caractéristiques géographiques de la localité de N'Djaména

La ville de N'Djaména est située à une latitude de  $12^{\circ} 07' N$ , une longitude de  $15^{\circ} 03' E$ , et une altitude de 295 mètres dans la zone sahélienne. C'est la capitale du Tchad, située au confluent des rivières Chari et Logone. N'Djaména est la seule grande ville dans un pays peu urbanisé. Elle connaît un climat aride avec une saison sèche de 9 mois, tandis que la saison humide dure 3 mois (de juillet à septembre). Les précipitations annuelles cumulées sont inférieures à 500 mm par an (ANAM, 2010).

**Figure 4:** Carte de localisation géographique de la ville de N'Djaména**Tableau 1:** Présentation de la situation climatique de la zone d'étude (Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména): des valeurs des moyennes et d'écart types des températures minimale, maximale et moyenne, de la pluviométrie et d'humidité relative

Station	Température maximale (°C)		Température minimale (°C)		Température moyenne (°C)		Pluviométrie moyenne annuelle (mm)		Humidité relative (%)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Bol	36,5	2,3	22,4	1,8	29,5	2	231	1,9	31	7
Fianga	44	4,3	13,1	3,2	30,6	5,6	890,6	92	49,5	28,3
Moundou	42	4,3	12,6	3	27,5	1,1	1040	103,7	58	23
N'Djaména	36	3,6	22	4	29	3,8	548	6	39	25

**Figure 5:** Cycle annuel des régimes des précipitations et des températures moyennes (1981-2020) des villes de Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména



## 2.2 Données

Les données de cette étude proviennent de la base de données climatologiques de l'Agence Nationale de Météorologie du Tchad. Il s'agit de données de précipitations et de températures quotidiennes et mensuelles issues des stations en question de 1981 à 2020 (40 ans). Cependant, le recours aux données de réanalyse a été nécessaire pour compenser les données manquantes. Les réanalyses ont fourni des ensembles de données combinant des données d'observation par satellite et par station, particulièrement utiles pour les études climatiques (Schubert et al., 1993).

Les données de réanalyse utilisées sont celles du modèle ARC2 avec une résolution spatiale de 10 km ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ) produites par le Centre de Prévision Climatique (CPC) de l'Administration Nationale Océanique et Atmosphérique (NOAA) (Novella & Thiaw, 2012). L'utilisation de ces données a été validée en les comparant avec des données observées pour conserver des ensembles de données proches des données réelles. La qualité des données a ensuite été évaluée en comblant les données manquantes avec des valeurs médianes et en éliminant les données aberrantes facilement détectées par le logiciel Rclimdex.

### 2.3 Méthodes d'analyse

Pour déterminer dans quelle mesure les activités humaines ont perturbé le système climatique, les climatologues ont développé des processus de détection et d'attribution du changement climatique. La détection consiste à démontrer que le climat a changé de manière statistiquement significative, sans en donner la raison (Ribes et Planton, 2011). Il s'agit donc de justifier statistiquement l'existence d'un changement réel, par opposition à une fluctuation climatique "normale". De plus, nous avons d'une part étudié l'évolution (variabilité et tendance) des précipitations annuelles et des températures avant et après la rupture détectée par des tests statistiques et d'autre part, nous avons analysé les tendances et la variabilité des indices de précipitations et de températures extrêmes.

Pour l'analyse de la variabilité interannuelle des précipitations, nous avons utilisé la méthode de Nicholson (1988), qui a permis d'identifier les périodes d'années sèches et humides dans chaque station. Elle est définie comme une variable centrée et réduite exprimée par l'équation (Servat et al., 1998):

$$I = (X_i - \bar{X}) / \sigma$$

Avec  $X_i$ : variable de l'année  $i$ ,  $\bar{X}$ : moyenne de la variable sur la période étudiée et  $\sigma$ : écart-type de la variable sur la période étudiée. La moyenne mobile centrée et réduite sur 5 ans a été appliquée car elle réduit les petites fluctuations internes et met en évidence les tendances majeures des indices de précipitations.

L'approche adoptée dans cette étude pour analyser les événements extrêmes de précipitations et de températures est celle des indices climatiques (Aguilar et al., 2009; Hountondji et al., 2011; N'Guessan Bi et al., 2018). Elle a été proposée par l'équipe d'experts sur la détection du changement climatique et les indices (ETCCDI) en utilisant le programme principal ClimPACT 2 généré avec le logiciel RCLIMDEX.

Dans cette étude, 7 indices ont été retenus, dont 5 caractérisant les précipitations extrêmes. Ceux-ci incluent la quantité totale de précipitations annuelles (PRCPTOT), l'intensité des précipitations quotidiennes (SDII), le nombre de jours de pluie intense (R20), la quantité totale annuelle de jours très humides (R95p) et le pourcentage de précipitations annuelles totales sur des jours très humides (R95pTOT).

Pour les extrêmes de température, 2 indices à savoir TX90p et TN90p ont été retenus, représentant respectivement le pourcentage de jours et de nuits climatologiquement chauds. Le choix de ces indices est justifié par le fait qu'ils sont les plus pertinents pour mettre en évidence l'étendue de la variabilité et du changement climatiques et l'évolution des inondations en termes de fréquence et d'intensité des inondations en tant que facteurs de prolifération des agents vecteurs du paludisme et du choléra.

**Tableau 2:** Description des indices des extrêmes pluviométriques et des températures

Indices	Description	Définition	Unité
PRCPTOT	Total annuel des précipitations des jours pluvieux	PRCP total annuel en jours humides ( $RR \geq 1$ mm). PRCPTOT est exprimé en pourcentage par rapport à la période de référence préindustrielle 1861–1880.j.	Mm
SDII	Indice simple de l'intensité des précipitations	Soit $RR_{wjl}$ volume journalier de précipitations enregistré les jours de pluie, $w$ ( $RR \geq 1$ mm) de la période $j$ . Si $W$ représente le nombre de jours de pluie de $j$	Jour
R20mm	Nombre annuel de jours où précipitations $\geq 20$ mm	Soit $RR_{ij}$ volume journalier de précipitations enregistré le jour $i$ de la période $j$ . Compter le nombre de jours où : $RR_{ij} \geq 20$ mm	Jour
R95p	Total annuel de PRCP lorsque $RR > 95$ e percentile	$RR_{wjl}$ volume journalier de précipitations enregistré un jour pluvieux, ' $w$ ', ( $RR \geq 1.0$ mm) de la période $i$ , et $RR_{wn95}$ le 95e percentile pour les précipitations enregistrées lors de journées pluvieuses pendant la période de référence 1981-2010.	Jour
R95PTOT	Pourcentage des hauteurs totales annuelles de pluies des jours très humides	Soit $RR_{wjl}$ volume journalier de précipitations enregistré un jour pluvieux, ' $w$ ', ( $RR \geq 1.0$ mm) de la période (1981-2010), et $RR_{wn95}$ le 95e percentile. $R95pTOT = 100 \times R95p / PRCPTOT$	%
TN90P	Pourcentage de jours où la TN > 90e percentile	Pourcentage de nuits climatologiquement chaudes (Températures minimales supérieure au dernier décile (décile quotidien calculé sur de 5 jours consécutifs).	%
TX90P	Pourcentage de jours où la TX > 90e percentile	Pourcentage de jours climatologiquement chauds (journées où la température maximale est supérieure au dernier décile (décile quotidien calculé sur 5 jours consécutifs).	%

Pour mettre en évidence la variabilité chronologique des précipitations, des températures maximales et minimales à chaque station, nous avons procédé à la détection de ruptures dans les séries puis analysé leur évolution, leur tendance générale et leur signification. Les ruptures dans les séries de données ont été détectées à l'aide des tests statistiques de Pettitt (1979), Lee Heghinian (1977), U de Buishand (1984) et la méthode de segmentation de Hubert (1989), qui ont permis de détecter des changements potentiels dans les modèles de précipitations et de températures. Ces tests sont regroupés dans le logiciel Khronostat développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'Université de Montpellier (Boyer, 1998).

La tendance annuelle a été identifiée à l'aide de la méthode de régression linéaire (Brunetti et al., 2000). L'évolution de la signification statistique a été réalisée en utilisant le critère de Mann-Kendall (Sneyers, 1990). Ce test non paramétrique recherche la présence d'une tendance à long terme dans les données. Pour valider cette tendance, la probabilité, valeur-p,

a ensuite été évaluée, ce qui exprime la force de l'évidence pour ou contre cette hypothèse (la tendance est acceptée avec une valeur- $p < 0,05$  considérant un niveau de confiance de 95 %).

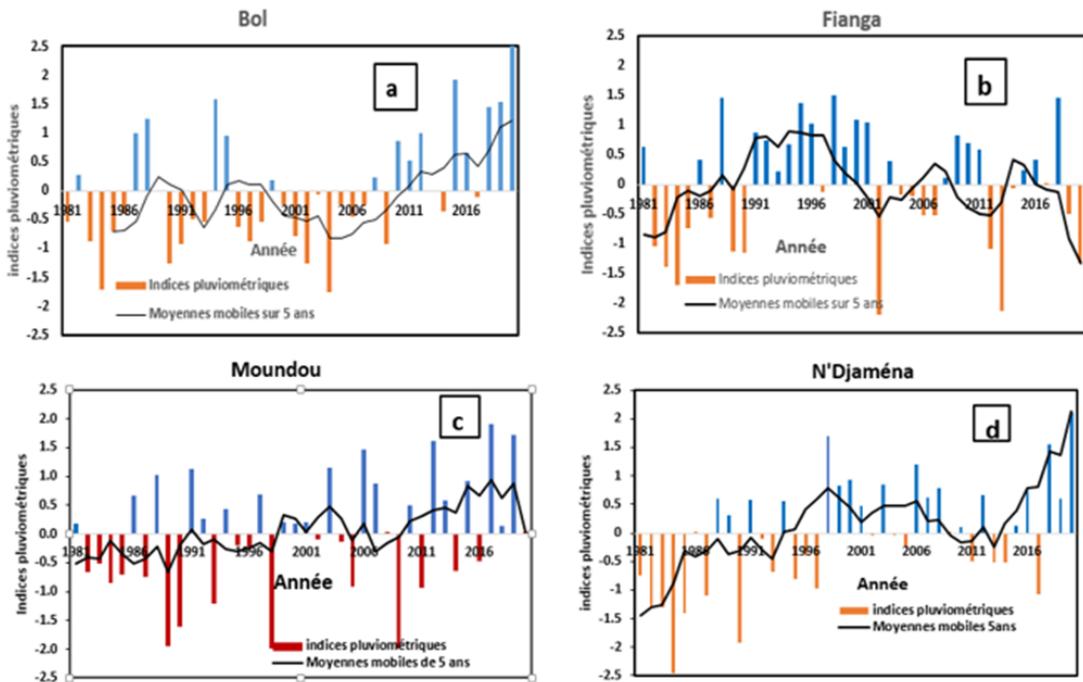
### III Résultats

#### 3.1 Analyse de l'évolution des indices précipitations

La figure 6 illustre la variabilité interannuelle des précipitations à travers des valeurs standardisées (anomalies) sur la série de données de 1981 à 2020 des stations de N'Djaména, Moundou, Fianga et Bol. L'application de la méthode de segmentation de Hubert et Carbonnel (1989) sur la série de précipitations de 1981 à 2020 a permis de détecter des points de rupture pour les quatre emplacements aux années suivantes : Bol en 1995, Fianga en 1984, Moundou en 2010 et N'Djaména en 1996. À l'exception de Fianga, qui présentait un modèle de précipitations très variable avec une tendance à la baisse, tous les autres lieux ont connu une tendance à l'augmentation des conditions de précipitations pendant la décennie 2010-2020, en particulier au cours des 4-5 dernières années (2015-2020). Globalement, il y a eu une alternance d'années sèches et humides après les années 1980, marquée par un épisode de sécheresse extrêmement sévère d'environ 5 années consécutives.

Le site de Bol a connu trois périodes de 1981 à 1995 marquées par une forte variabilité, suivies d'une période de sécheresse persistante de 1996 à 2010 (figure 6d) avec une diminution de 17% (voir tableau 3) des précipitations par rapport à la moyenne. Pendant la période de 2011 à 2020, un retour à des conditions de précipitations excédentaires a été observé. Les sites de N'Djaména (figure 6a), Moundou (figure 6b) et Fianga (figure 6c) ont connu une forte variabilité avec une tendance générale à la hausse, même si elles ne sont pas statistiquement significatives sauf à la station de N'Djaména où la tendance est significative au seuil de 5% après un test de Mann-Kendall. Les localités de N'Djaména, Moundou et Fianga ont enregistré des excédents de précipitations d'environ 31,5%, 8% et 23,8% (tableau 3) pendant la période 2010-2020, avec des épisodes de fortes pluies au cours des 5 dernières années (2015-2020) à N'Djaména et Moundou. Cette situation pourrait expliquer les graves inondations de 2020, qui ont affecté 87% du territoire national.

**Figure 6:** Évolution interannuelle de l'indice pluviométrique standardisé (couleur bleu et rouge) et moyenne mobile (courbe en couleur noire dans les localités de Bol(a), Fianga (b), Moundou(c) et N'Djaména



**Tableau 3:** Évolution de la pluviométrie avant et après les années de rupture obtenues par le test de Pettitt et taux de variation des localités (Bol, Fianga, Moundou et températures minimales N'Djaména)

Localité	Période avant rupture	Période après rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Taux de variation
Bol	1981-1995	1996-2020	211,7	174,9	-17,4%
Fianga	1981-1984	1985-2020	683,6	846,1	23,8%
Moundou	1981-2010	2011-2020	1014,2	1100,9	8,0%
N'Djaména	1981-1996	1997-2020	464,9	611,4	31,5%

### 3.2 Analyse de l'évolution des températures extrêmes

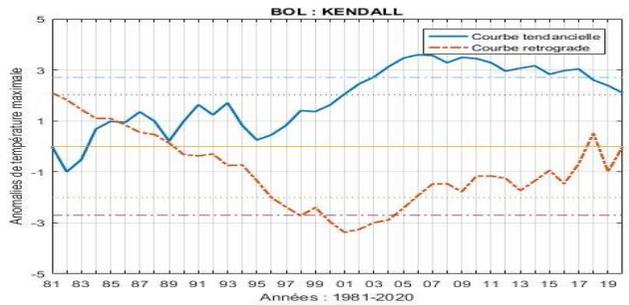
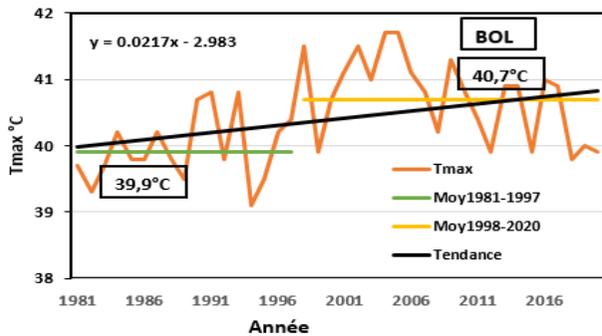
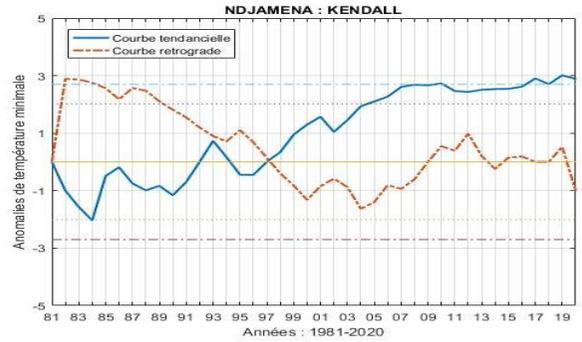
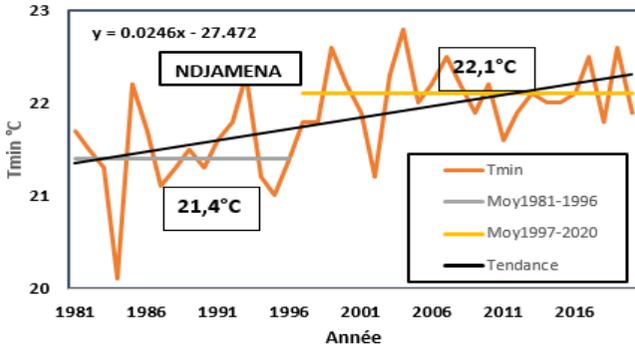
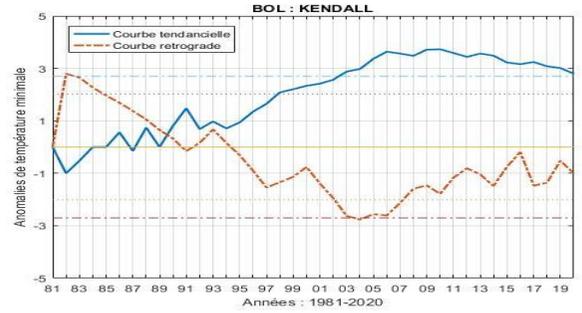
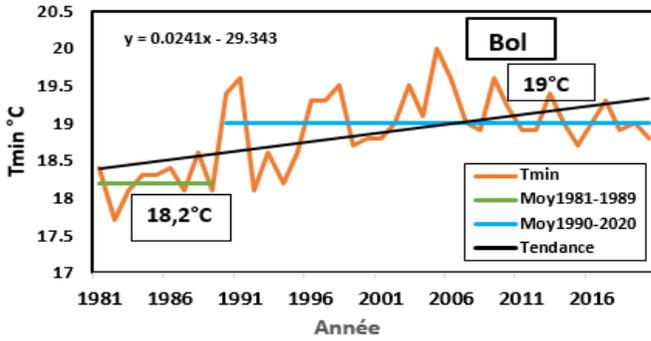
Les moyennes annuelles des températures maximales et minimales pour la zone d'étude ont été calculées en utilisant la série de données de 1981 à 2020. Ces moyennes sont représentées dans les graphiques des figures 12 et 13. Les deux variables, les températures minimales (Tmin) et les températures maximales (Tmax), ont augmenté pendant la période examinée. L'Afrique de l'Ouest et Centrale sont particulièrement menacées par le changement climatique. Cette augmentation est significative au niveau de

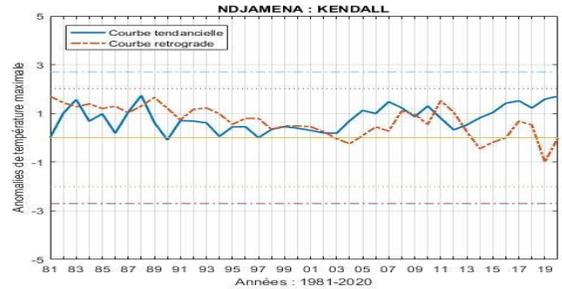
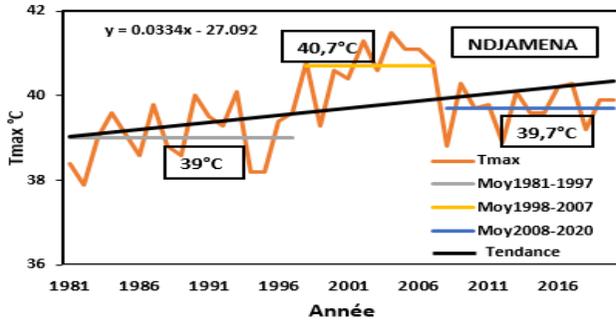
5% en utilisant le test de Mann-Kendall (voir Figures 12 et 13). En général, on peut constater que les températures minimales ont augmenté plus que les températures maximales dans tous les lieux étudiés et de manière linéaire, tandis que les températures maximales ont connu une variabilité d'une décennie à l'autre (voir les cartes de température de N'Djaména et Moundou). Une augmentation particulière des températures minimales et maximales est notée pendant la période 1997-2007.

### **3.2.1 Analyse des températures minimales et des températures maximales des stations de Bol et N'Djaména (zone sahélienne du Tchad)**

D'après le test de Pettitt réalisé sur les séries de données des températures minimales et maximales aux stations de Bol et N'Djaména de 1982 à 2020, deux années de rupture (1995 et 1996) ont été identifiées pour les températures minimales et maximales respectivement, à la station de Bol, avec deux sous-périodes (sous-séries) pour les températures minimales de 1982 à 1989 et de 1990 à 2020, et pour les températures maximales de 1981 à 1996 et de 1997 à 2020. Les valeurs des températures minimales ont varié de 18,2 à 19°C (une augmentation de 1,2 °C), et les valeurs des températures maximales ont varié de 39,9 à 40,7°C (une augmentation de 0,8°C). Ces tendances ont été confirmées par le résultat du test de Mann-Kendall, qui a mis en évidence la signification de la tendance au niveau de 5%. Les températures minimales à N'Djaména ont varié de 21,4 à 22,2°C (une augmentation de 0,7°C) pendant les périodes 1982-1996 et 1997-2020. Pendant ce temps, les températures maximales ont connu une augmentation de 1,7°C entre 1981 et 2007, suivie d'une diminution de 1°C pendant la période 2008-2020. Cependant, la tendance des températures maximales sur toute la série de 1981 à 2020 est à la hausse, avec une augmentation de 0,7°C, et est significative au niveau de 5% en utilisant le test de Mann-Kendall (Figure 7).

**Figure 17:** Évolution des moyennes des températures minimales et maximales de 1981 à 2020 et les périodes dégagées par le test de segmentation de Hubert. Les moyennes par périodes et les tendances des stations de N'Djaména et Bol de 1981 à 2020 (zone sahélienne)



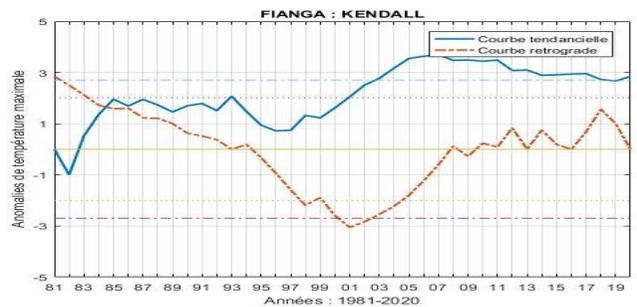
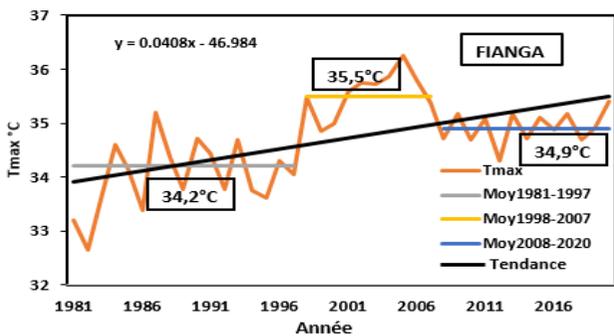
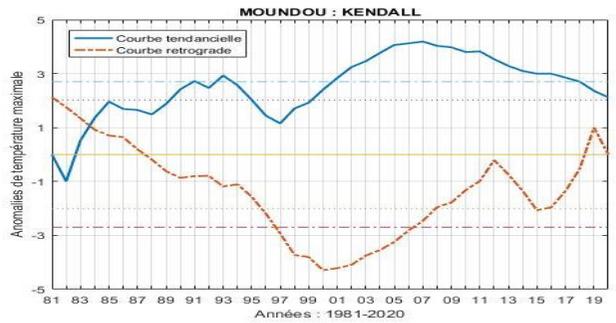
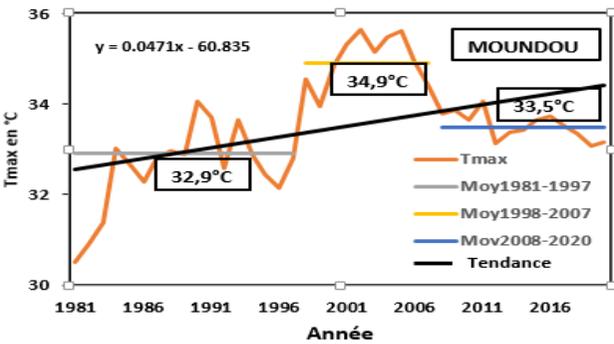
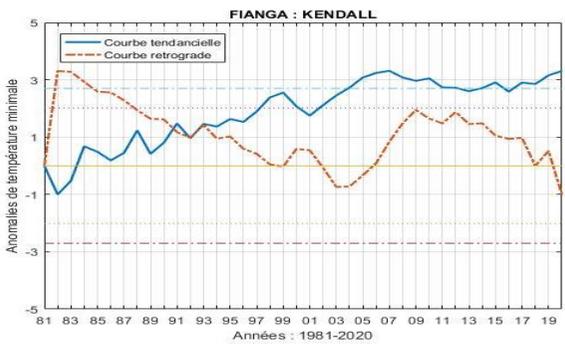
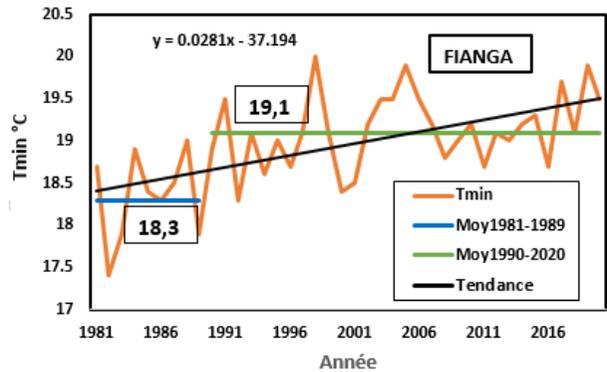
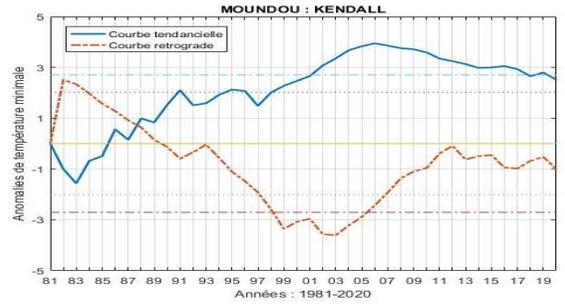
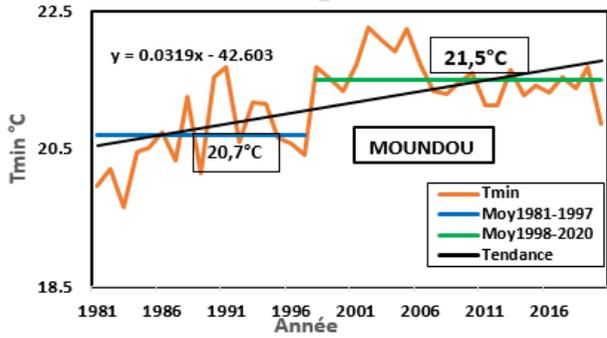


### 3.2.2 Analyse des températures minimales et températures maximales des stations de Fianga et Moundou (zone soudanienne du Tchad)

Les stations de Moundou et Fianga, situées dans la zone soudanaise, ont connu une augmentation significative des températures minimales et maximales, comme confirmé par le test de Mann-Kendall au niveau de 5% (Figure 8). La série de données de température a enregistré des ruptures avec plusieurs sous-séries. Les tests de Pettitt ont identifié 1997 comme l'année de rupture pour Moundou et Fianga.

Les températures minimales à Moundou sont passées de 20,7 à 21,5°C, soit une hausse de 0,8°C, pendant les sous-périodes 1981-1997 et 1998-2020, avec une température minimale normale (1981-2010) de 21,1°C. Pendant ce temps, les températures maximales, malgré une tendance générale à la hausse, ont connu une alternance de valeurs basses et élevées, avec une température maximale moyenne de 32,9°C entre 1981-1997, 34,9°C entre 1998-2007, une variation de 2°C qui est ensuite tombée à 33,5°C entre 2008-2020. Cependant, il y a eu une augmentation globale de 0,6°C de 1981 à 2020. La température maximale normale (1981-2010) est de 33,5°C. À la station de Fianga, les températures maximales ont varié de 34,2°C à 35,5°C, respectivement pendant les périodes 1981-1997 et 1998-2007, soit une augmentation de 1,3°C. Elles ont ensuite connu une diminution de 0,6°C entre 2008 et 2020. La tendance générale sur l'ensemble de la série de 40 ans est une augmentation de 0,8°C, pendant les périodes 1981-1989 et 1990-2020.

**Figure 8 :** Les moyennes par périodes et les tendances des stations de Fianga et Moundou de 1981 à 2020(zone soudanienne)



### 3.3 Analyse des indices des extrêmes climatiques

#### 3.3.1 Tendance à l'aide de test de Mann-Kendall

Les résultats obtenus par l'application du test de Mann-Kendall à un risque de  $\alpha = 5\%$  (P-value = 0,05), sur les indices des extrêmes climatiques (PRCPTOT, R95p, R95pTOT, SDII, R20, TN95p et TX95p) retenus pour les 4 stations étudiées sont consignés dans le tableau 4. Pour le test appliqué, un seuil de signification de 5% a été utilisé, indiquant s'il y a ou non des tendances monotones. Les valeurs P inférieures à 0,05 sont considérées comme des indicateurs d'une tendance. Si la valeur de la pente est positive, la tendance est à la hausse, et si elle est négative, la tendance est à la baisse (Tableau 4).

**Tableau 4 :** Résultats des tests de Mann-Kendall au seuil 5% exprimés par les P-value inférieures à 0,05

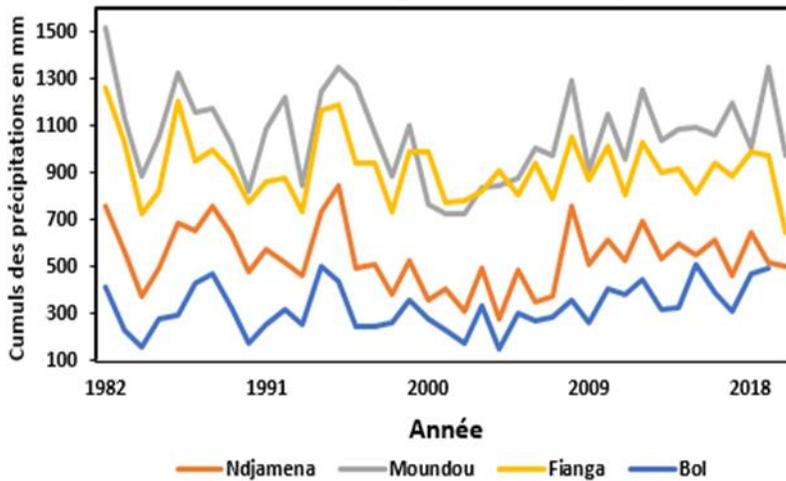
Indices	BOL		FIANGA		MOUNDOU		N'Djaména	
	P-Value	Slope	P-Value	Slope	P-Value	Slope	P-Value	Slope
TX90p	0,138	0,153	0,055	0,221	0,293	0,160	0,123	0,153
TX90p	0,683	0,040	0,000	0,295	0,016	0,226	0,149	0,040
SDII	0,039	0,037	0,525	0,009	0,039	0,027	0,278	0,037
R20mm	0,023	0,059	0,324	0,045	0,046	0,107	0,124	0,059
R95p	0,029	2,255	0,479	1,206	0,009	4,093	0,546	2,255
R99p	0,294	0,878	0,174	1,443	0,004	2,881	0,780	0,878
PRCPTOT	0,054	2,809	0,177	-2,682	0,488	-1,902	0,382	-1,700

#### 3.3.2 Cumul annuel des hauteurs de pluies

De 1982 à 1990, les valeurs annuelles cumulées des précipitations ont oscillé entre 1514,4 mm à Moundou en 1982 et 725 mm à Fianga en 1984, deux localités de la zone soudanaise du Tchad. En revanche, Bol et N'Djaména dans la zone sahéenne ont enregistré des précipitations cumulées allant de 756,3 mm en 1982 à N'Djaména à 157,4 mm en 1984 à Bol pendant la même période. Durant les périodes 1990-1999 et 2000-2011, tous les sites des zones soudanaise et sahéenne ont enregistré de faibles précipitations cumulées, avec 833 mm à Moundou, soit une baisse de 500 mm par rapport aux précipitations cumulées les plus élevées en 1982. La plus faible précipitation cumulée a été enregistrée à Bol, avec 147 mm en 2004.

Cette condition s'est progressivement améliorée pendant la période 2011-2020, atteignant des valeurs élevées de 1347,5 mm. La tendance générale est à la baisse, mais pas statistiquement significative au niveau de 5%, sauf à la station de Bol où la tendance à la hausse est significative (Tableau 4).

**Figure 9 :** Évolution des cumuls annuels des hauteurs de pluies (PRCTOT) de 1981 à 2020 des stations de Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména



### 3.3.3 Évolution annuelle des hauteurs et de la fréquence des pluies extrêmes

L'évolution annuelle des hauteurs (R95p) et de la fréquence des précipitations extrêmes (R95pTOT) a été caractérisée par une forte variabilité de diminution et d'augmentation des accumulations de précipitations extrêmes dans la plupart des stations, à l'exception de Moundou, qui a connu une tendance claire à la hausse de 21 à 573 mm avec une évolution de la fréquence de 15 à 27%. La période de 1981 à 1990 a été marquée par des perturbations significatives dans la distribution dans le temps et l'espace.

En général, les décennies 2000-2010 et 2010-2020 ont été marquées par de bonnes précipitations, tant en hauteur qu'en fréquence, avec des quantités atteignant jusqu'à 573 mm à Moundou, tandis que Bol a connu la fréquence la plus élevée (42%) pour la période 2011-2020. Ces événements de précipitations extrêmes sont responsables des inondations graves de ces dernières années à N'Djaména et Moundou, causant des dommages importants (SNLCC, 2019).

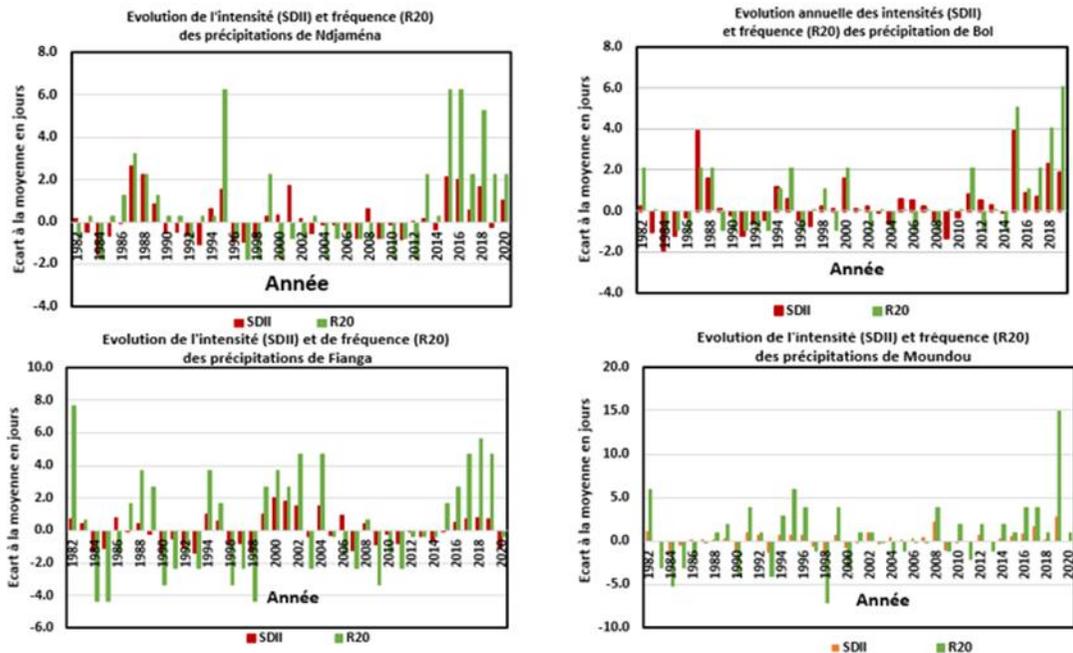
**Tableau 5:** Évolution décennale de pourcentage des hauteurs totales annuelles de pluies des jours très humides (R95p) et de la fréquence (R95pTOT) des pluies extrêmes

Décennie	BOL		FIANGA		MOUNDOU		N'DJAMENA	
	R95p	R95pTOT	R95p	R95pTOT	R95p	R95pTOT	R95p	R95pTOT
<b>1981-1990</b>	0 - 232	20,2%	0 - 329	21,1%	21-329	15,3%	0 - 383	28,3%
<b>1991-2000</b>	0 – 118	13,5%	19 – 371	18,2%	0 - 320	18%	19 -295	17%
<b>2001-2010</b>	15 – 68	13%	67 – 323	20,1%	141 - 287	18,7%	23 -105	13,1%
<b>2011-2020</b>	32 – 218	42,3%	41 – 308	24%	134 - 573	27%	63 - 331	31,4%

### 3.3.4 Analyse l'évolution de fréquence des nombres de jours de fortes pluies et intensités

La fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes sont deux indicateurs pertinents caractéristiques du changement climatique. La Figure 10 montre une forte variabilité de la fréquence et de l'intensité pendant la période de 1981 à 2013, avec une tendance à la baisse du nombre de jours avec des précipitations supérieures à 20 mm (R20), confirmant ainsi les résultats de l'étude de Panthou et al. (2014) qui a révélé que le régime des précipitations sahéennes au cours des 10 dernières années était caractérisé par un déficit significatif dans le nombre de jours de pluie. À partir de 2014, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux a été observée dans toutes les stations, à l'exception de Moundou qui a connu une diminution de l'intensité (SDII). La localité de Fianga a enregistré une augmentation persistante de la fréquence et de l'intensité pendant les deux périodes, 1999-2004 et 2014-2020. Il convient de noter que les stations de N'Djaména et Bol dans la zone sahéenne ont connu des épisodes de précipitations de haute fréquence et intensité au cours des cinq dernières années.

**Figure 10:** Évolution interannuelle de 1981 à 2020 de l'intensité (SDII): histogramme en rouge et fréquence (R20): histogramme en vert des précipitations des stations de, Bol, Fianga, Moundou et N'Djaména



### 3.3.5 Analyse des nuits climatologiquement chaudes

Le pourcentage de nuits climatologiquement chaudes (TN90p) est un indicateur pertinent pour identifier les signes de changement. Des tests statistiques utilisant le test de Pettitt aux niveaux de 10 %, 5 % et 1 % ont permis de détecter des années de rupture et des sous-séries en segmentant les données à l'aide de la méthode Hubert. Les tendances des indices sont présentées dans le Tableau 5. Entre 1997 et 2006, les nuits chaudes ont augmenté dans tous les sites sauf pour la station de Bol où elles sont restées stables à 8 % sur toute la série. Cependant, une diminution des nuits chaudes a été observée entre 2007 et 2020 dans les quatre localités, malgré une tendance générale à la hausse sur la période de 40 ans. Néanmoins, les valeurs les plus élevées ont été observées aux stations de Moundou et Fianga dans la zone climatique humide soudanaise.

**Tableau 6:** Analyse des pourcentages des nuits climatologiquement chaudes par rapport à la date de rupture détectée par le test de Pettitt et les périodes dégagées par la segmentation de Hubert

Station	Test de Pettitt	Segmentation de Hubert	Moyenne avant rupture (%)	Moyenne après rupture (%)	Taux de variation (%)
Bol	1988	1982- 1988	9,9		9,9
Fianga	1996***	1982-2004	6,6		
		2005- 2006		23,5	16,9
		2007- 2020		11,5	4,9
Moundou	1997***	1982-2000	5,1		
		2001- 2006		21	15,9
		2007- 2020		8,8	3,7
N'Djaména	1996**	1982-1996	6,2		
		1997- 2006		15,8	9,9
		2007-2020		9	2,8

NB : \* ; \*\* et \*\*\* significatif respectivement au seuil de 10% ; 5% et 1% selon le résultat du test de Pettitt (1979)

### 3.3.6 Analyse des jours climatologiquement chauds

La fréquence des jours chauds (TX90p) a augmenté après les années de rupture (1995, 1996 et 2007) détectées par le test de Pettitt aux niveaux de 10 %, 5 % et 1 % dans les quatre stations pendant les périodes de 1997 à 2006. Les taux de changement variaient de 3 % à 26,4 % à N'Djaména, de 1 % à 14,8 % à Bol, de 6,3 % à 30,1 % à Moundou et de 3,7 % à 19,7 % à Fianga. Comme le montre le Tableau 7, il y a eu une diminution des jours chauds pendant la période de 2007 à 2020 dans les quatre stations.

**Tableau 7:** Analyse des pourcentages de nombre des jours climatologiquement chauds par rapport à la date de rupture détectée par le test de Pettitt et les périodes dégagées par la segmentation de Hubert

Station	Test de Pettitt Année de rupture	Segmentation de Hubert	Moyenne avant rupture (%)	Moyenne après rupture (%)	Taux de variation (%)
Bol	1995***	1982-2000	7,1		9,9
		2001-2005		21,9	14,8
		2006-2018		8,8	1,1
Fianga	1997***	1982-2000	4,9		
		2001- 2006		24,6	19,7
		2007- 2020		8,6	3,7
Moundou	1996***	1981-1996	3,5		
		2001- 2006		33,6	30,1
		2007- 2020		9,8	6,3
N'Djaména	1996***	1982-1996	6,4		
		1997- 2003		15,3	8,9
		2004-2006		29,9	26,4
		2007-2020		9,4	3

Les signes \* et \*\* \*\*\* signifient que la rupture est respectivement significative à 90 et 95 % et 99% selon le résultat du test de Pettitt (1979)

#### IV. Discussion et conclusion

L'objectif de cette étude est de détecter les signaux du changement climatique dans les localités de Bol, Fianga, Moundou et Ndjamen. Les résultats obtenus montrent qu'au cours des dernières décennies, il y a eu une modification du régime des précipitations en termes de fréquence et d'intensité dans tous les sites. Cependant, une légère diminution de l'accumulation annuelle des précipitations a été observée de 1981 à 2020. Cette tendance générale à la baisse sur la série 1981-2020 est liée à des épisodes de sécheresse extrêmement sévères qui ont duré environ 5 années consécutives pendant les décennies 1980-1990 et 1990-2000, marquées par le fort phénomène El Niño de 1983/1984 et 1997 (IPCC, 1998) et la sécheresse historique de 1983-1984 qui a touché l'Afrique centrale et le Sahel (Paeth et al., 2011). Ces résultats ont également été observés dans les travaux de New et al., (2006) et Aguilar et al., (2009). En effet, dans leurs études sur l'évolution des conditions climatiques quotidiennes extrêmes couvrant l'Afrique australe et occidentale, New et al., (2006) ont montré que les régions connaissent une diminution globale des précipitations annuelles totales et du nombre de jours de pluie. Aguilar et al., (2009), dans leur analyse des précipitations en Afrique centrale entre 1955 et 2006, sont parvenus aux mêmes conclusions. Alors que la tendance générale des précipitations est à la baisse de 1981 à 2020, une variabilité croissante a été observée de 2011 à 2020 dans tous les sites, avec des excédents de précipitations à N'Djaména, Moundou et Fianga d'environ 31,5 %, 8 % et 23,8 % respectivement, pendant la période 2010-2020 avec des épisodes de fortes précipitations au cours des 5 dernières années (2015-2020) à Ndjamen avec des écarts cumulés annuels de plus de 100 mm par rapport à la norme (1981-2010). Ces variabilités ont été considérées par certains auteurs comme un retour à des conditions de précipitations normales, en particulier Salack et al., (2011), qui ont noté pour les régions soudanaises et sahéliennes du Sahel une tendance à la hausse des précipitations annuelles totales accompagnée d'une augmentation de la fréquence de courts épisodes de sécheresse extrême et d'événements de fortes précipitations (inondations), rendant la saison des pluies plus incertaine et imprévisible.

Les résultats de l'étude montrent également une augmentation générale des événements de précipitations extrêmes en termes de fréquence des fortes pluies (R20), d'intensité (SDII), de hauteurs de précipitations (R95) et de fréquences de jours très humides (R95pTOT) dans tous les sites au cours des cinq dernières années (2015-2020). Cependant, une augmentation plus notable des fréquences de jours très humides (R95pTOT) a été observée dans la zone sahélienne par rapport à la zone soudanaise, avec 42 % à Bol et 31 % à Ndjamen. Ces analyses confirment les résultats des études récentes (IPCC, 2014; Ozer et al., 2017; Biasutti, 2019). Cette

tendance a déjà été observée par les études de l'IPCC (2017), qui prévoient une intensification des phénomènes climatiques extrêmes au cours des prochaines décennies au Sahel. Cela a été confirmé par les études de Hangnon et al., (2015), Bamba et al. (2015) et IPCC (2014). L'augmentation de l'accumulation des précipitations, de la fréquence et de l'intensité a conduit à de graves inondations en 2020, qui ont affecté 87 % du territoire national (OCHA, 2022). Si cette tendance se poursuit, nous assisterons à une augmentation des catastrophes avec des dommages et des coûts associés (Sultan 2012; Sultan et al 2013; Le Cozannet et al., 2015; Avila et al., 2016; Taylor et al., 2017) et une résurgence d'épidémies de maladies sensibles au climat telles que le paludisme et le choléra (Marano et Toussaint, 2015).

Les températures extrêmes (minimales et maximales) ont augmenté sur toute la série 1981-2020, confirmant ainsi les résultats de l'IPCC (2014) qui prévoit des changements de température et de précipitations extrêmes sur l'Afrique de l'Ouest et du Centre, avec une augmentation de la température moyenne mondiale de 1,5 °C et 2 °C par rapport à la période préindustrielle (Seneviratne et al., 2016; Wartenburger et al.; 2017).

Nous remarquons généralement que les températures minimales ont augmenté plus que les températures maximales dans toutes les localités étudiées, et de manière linéaire, tandis que les températures maximales ont connu une variabilité d'une décennie à l'autre (voir les cartes de température de Ndjaména et Moundou). Les localités de Bol et Ndjaména dans la zone sahélienne ont enregistré une augmentation des températures minimales de 0,7 °C et 1,2 °C respectivement ; et des températures maximales de 0,7 °C et 0,8 °C, tandis que les localités de Moundou et Fianga dans la zone soudanaise ont enregistré une hausse des températures minimales de 0,8 °C pour les deux localités et des températures maximales de 0,6 °C et 0,7 °C montrant ainsi une augmentation des températures minimales et maximales, légèrement supérieure par rapport aux valeurs des localités de la zone soudanaise. Nous notons une augmentation particulière des températures minimales et maximales pendant la période 1997-2007.

La fréquence des jours chauds (TX90p) et des nuits chaudes (TN90p) a montré une tendance à la hausse pendant la période entre 1996/1997 et 2007, ce qui corrobore les résultats de Mbaiguedem (2012) qui révèlent qu'à partir de 2006, il y a une persistance de nuits chaudes de plus de 20 jours, et aussi les résultats de Bedoum (2013) dont les indices indiquent une augmentation des nuits chaudes au Tchad et en Afrique centrale. D'autre part, nous notons une baisse significative des TN90p et TX90p entre 2007 et 2020. Cela pourrait s'expliquer par l'amélioration des conditions de précipitations.

Les précipitations annuelles au Tchad ont connu des périodes alternées d'humidité et de sécheresse, avec une tendance générale à la baisse

entre 1981 et 2020. Un changement de régime des précipitations depuis la fin des années 1990, détecté par des tests statistiques comme une année de rupture dans la série chronologique a été observé. L'étude nous a permis de montrer et de mettre en évidence une succession de périodes sèches et humides. Il semble que les décennies 1980-1990 et 1990-2000, et une partie des années 2000, aient été caractérisées par des épisodes de déficits pluviométriques sévères. À l'exception de la localité de Bol, où la tendance des précipitations a diminué d'environ 17 %, toutes les autres localités ont connu une forte variabilité et une tendance à des conditions de précipitations excessives pendant la décennie 2010-2020.

Ce redressement semble plus prononcé dans la zone sahélienne que dans la zone soudanaise. Le retour des pluies dans les localités étudiées a été marqué par une forte augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes, ce qui pourrait expliquer les graves inondations des dernières années qui ont affecté 87 % du territoire national entre 2019 et 2022. D'autre part, les températures maximales et minimales ont augmenté respectivement de 0,6 à 1,2 °C, avec une augmentation plus accélérée des températures minimales et une tendance croissante des nuits climatologiquement chaudes (TN90p), qui est l'une des principales caractéristiques du changement climatique.

On peut conclure que les localités de la zone d'étude sont caractérisées par des schémas de précipitations instables associés à des températures croissantes. Un tel contexte climatique n'est pas sans conséquences pour le développement des secteurs clés. Ces conditions sont propices et favorables au développement des moustiques, vecteurs du parasite *Plasmodium* (Grover-Kopec et al., 2006), comme l'ont révélé les résultats de l'étude de Huston et al., (2019), qui indiquent que les changements à long terme des températures et des précipitations, l'augmentation de la variabilité climatique et une fréquence plus élevée d'événements météorologiques extrêmes, auront un impact sur divers risques de maladies infectieuses d'une manière particulière.

En conclusion, de véritables signaux de variabilité et de changement climatiques caractérisés par une tendance générale à la diminution des précipitations ont été identifiés dans toutes les localités, bien qu'une variabilité accrue avec des précipitations intensifiées ait été notée au cours des dernières décennies, expliquant les graves inondations des dernières années (entre 2010 et 2020). Les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents avec ceux obtenus dans d'autres régions du globe. Les perturbations dans la distribution spatio-temporelle des précipitations et la tendance croissante des températures révélées sont statistiquement significatives, indiquant un schéma de réchauffement par paliers et sauts, nous permettant d'apprécier l'ampleur du changement climatique récent

(1981-2020). Il est essentiel d'étendre une telle étude à d'autres stations à travers le territoire national pour mieux comprendre l'évolution du changement climatique et ajuster les politiques publiques dans les secteurs clés du développement.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

### References:

1. AGUILAR, E., AzizBarry, A., Brunet, M., Ekan, L., Fernandes, A., Massoukina, M., ... Zhang, X. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114(D02115).
2. AURELIEN RIBES ET SERGE PLANTON, 2011, Détection et attribution des changements climatiques p. 211-213 CNRM, Toulouse.France.
3. BAMBA A., DIEPPOIS B., KONARE A., PELLARIN T., BALOGUN A., DESSAY N., KAMAGATE B., SAVANE I. et DIEDHIOU A., 2015: Changes in vegetation and rainfall over West Africa during the last three decades (1981-2010). *Atmospheric and Climate Sciences*, 5, 367-379.
4. BEDOUM, LOBITE BOUKA BIONA, BELL JEAN PIERRE1, ISSAK ADOUM, ROBERT MBIAKE AND LAOHOTE BAOHOUTOU, 2017, Évolution des indices des extrêmes climatiques en République du Tchad de 1960 à 2008, *Atmosphere-Ocean*, 55:1, 42-56, DOI: 10.1080/07055900.2016.1268995, publié en ligne en janvier 2017, 45p, <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1268995>.
5. BIASUTTIM. 2019 - Rainfall trends in the African Sahel: Characteristics, processes, and causes. *Wiley interdisciplinary reviews. Climate Change*, vol. 10, n° 4, article e591, 22 p. DOI: 10.1002/wcc.591.
6. BOYER J.F., 1998. *Khronostat statistical time series analyses software*. Montpellier: UMR 5569 Hydrosociences, IRD-Maison des sciences de l'eau.

7. BRUNETTI M., BUFFONI L., MAUGERI M., NANNI T., 2000: Precipitation intensity trends in Northern Italy. *International Journal of Climatology*, 20, 1017-1031.
8. BUISSAND T.A., 1982. Quelques méthodes des tests d'homogénéisation des précipitations. *Journal de l'Hydrologie*, 58, 11-27.
9. DAZE, A., AMBROSE, K. ET EHRHART, C. 2010, « Analyse de la vulnérabilité et de la capacité d 'adaptation au changement climatique », Manuel, CARE.
10. GIEC., 2014, Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 34 pages.
11. Grover-Kopec, E. K., et. al. (2006). Web-based climate information resources for malaria control in Africa. *Malaria Journal*, 5:38.
12. HANGNON H., DE LONGUEVILLE F. et OZER P., 2015 : Précipitations 'Extrêmes' et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé. XXVIII<sup>e</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, 497-502.
13. HUBERT P, CARBONNEL J.P., CHAOUICHE A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques : Application a des séries de précipitations et de débits en Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-67.
14. HUSTON PATRICIA, M.D., M.S.P., ERIKA BONTOVICS, LYAL SAIKALY, LAURA ROJAS HIGUERA, JOANNA ODRÓWAZ-PIENIAZEK, PASCALE SALVATORE, LAURA STEWART-DAVIS, 2019, Changement climatique et maladies infectieuses, ISSN 1719-3109 / Cat. HP3-1F-PDF / Pub. 180682, RMTC Volume 45-4.
15. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, A. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., 1322-1325.
16. IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. Global warming of 1.5 °C, *Special report*.
17. IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis report, contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland: IPCC.

18. IPCC., 2007:Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds.), Cambridge University Press: Cambridge, UK.
19. LEE A.F.S., HEGHINIAN S.M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables A Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 503-6.
20. LE COZANNET G, RAUCOULES D, WOPPELMANN G, GARCIN M, DA SYLVA S, MEYSSIGNAC B AND LAVIGNE F 2015 Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal) *Environ. Res. Lett.* 10 084016.
21. MARANO FRANCELYNE ET TOUSSAINTJEAN-FRANÇOIS, 2015, Climat et Santé, Appréhender les impacts du changement climatique sur la santé, adsp n° 93 10p.
22. MEEP, 2017 Stratégie nationale de lutte contre les changements climatiques, Document du Projet PARSAT avec les partenaires : AMCC+, Union Européenne et le FIDA, Page 17.
23. MEYBECK, A., Azzu, N., Doyle, M. et Gitz V., 2012. Agriculture in National Adaptation Programmes of Action (NAPA). In: A. Meybeck, J. Lankoski, S. Redfern, N. Azzu & V. Gitz. Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector. Proceedings of a joint FAO/OECD Workshop. Rome, FAO.
24. MBAIGUEDEM M., 2012. Etude de vulnérabilité et adaptation des femmes rurales face au changement climatique : Cas du Département du Chari au Tchad. Mémoire Mastère Changement Climatique et Développement Durable, Centre Régional AGRHYMET, Niger, 85 p.
25. NICHOLAS NOVELLA ET, WASSILA THIAW., 2012, AfricaRainfallClimatology Version, NOAA / NWS / NCEP/ Climate Prediction Center, Wyle Information Systems 9B.6 1-6pp.
26. OCHA, 2022 situation report on the floods in Chad, December 2022, FragkiskaMegaloudi Public Information Officer, Head of Public Information Unit fragkiska.megaloudi@un.org Catherine.
27. OMS. (2015). Protéger la santé face au changement climatique: évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation, Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, p. 80.
28. OZER P., LAMINOU MANZO O., TIDJANI A.D., DJABY B. et DE LONGUEVILLE F., 2017 - Évolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014). *Geo-Eco-Trop*, vol. 41, n° 3, p. 375-383.

29. PANTHOU G., VISCHEL T. et LEBEL T., 2014: Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.3984.
30. PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O., 1998. Analyse de séries pluviométriques.
31. PETTITT A.N., 1979. A Nonparametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135.
32. Richard Y., Castel T., Bois B., Cuccia C., Marteau R., Rossi A., Thévenin D., Toussaint H., 2014. Évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011). *Bourgogne Nature*, 19, 110-117.
33. RIGAUD, K., A. DE SHERBININ, B. JONES, J. BERGMANN, V. CLEMENT, K. OBER, J. SCHEWE, S. ADAMO, B. MCCUSKER, S. HEUSER, A. MIDGLEY., 2019. *Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration*. World Bank, Washington, DC.
34. SABOURY NDIAYE, 2018, Impact de l'adoption des stratégies d'adaptation au changement climatique sur la sécurité alimentaire et le revenu des ménages pastoraux dans la zone du Ferlo au Sénégal, Thèse de Doctorat, École Doctorale Développement Durable et Société (ED2DS), Sénégal Dakar.
35. SALACK, S., MULLER, B. & GAYE, A. T., 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: Integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(1-2), pp.1–22.
36. SENEVIRATEMPÉRATURES MINIMALESE S I, DONATMG, PITMAN A J, KNUTTI R AND WILBY R L 2016 Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets *Nature* 529 477–83.
37. SNEYERS R., 1990: On the statistical analysis of series of observations. World Meteorological Organization, Technical Note n 143, Geneva, 192 p.
38. Stern N. (2006). *Stern review: The economics of climate change*, Cambridge: Cambridge University Press.
39. SULTAN B., 2011. L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales, Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, 137 p.
40. SULTAN B, ROUDIER P, QUIRION P, ALHASSANE A, MULLER B, DINGKUHN M AND BARON C 2013 Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Saheli.

41. TAYLOR C M, BELUŠIC D, GUICHARD F, PARKER D J, VISCHEL T, BOCK O ´ and Panthou G 2017 Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations Nature 544 475.
42. UNFCCC, 2015 Conférence des Parties Vingt et unième session Paris, 30 novembre-11 décembre 2015, Projet de décision -/CP.21, p. 29.
43. Valette J-J., 2015. Santé et réchauffement climatique : quelles maladies faut-il redouter in WE DEMAIN.
44. WARTENBURGER R, HIRSCHI M, DONATM G, GREVE P, PITMAN A J AND SENEVIRATEMPÉRATURES MINIMALESES., 2017Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature : an interactive plotting framework Geosci. Model Dev. 10 3609.
45. YANDAÏ FISSOU HENRY, MOUNDINE KEBFENE, DJOUMBE EPHRAÏM, BOULOTIGAM KODBESSE, MOUKENET AZOUKALNE, KODINDO ISRAEL DEMBA ET HINZOUNBE CLEMENT KERAH, 2017, « Perception de risques du paludisme et utilisation des moustiquaires au Tchad », Int. J. Biol. Chem. Sci. 11(1), p. 228-236.