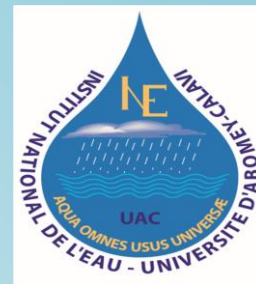




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE
L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

BOKOSSA Esther Jeannine

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie Quantitative

=====

**VARIATION CENTENNALE DU CLIMAT AU
BENIN**

=====

Maître de Mémoire

Dr HOUNGUE Rita

Maître de Stage

Ing. BESSOU Joseph



Année académique : 2023-2024



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

**INSTITUT NATIONAL DE
L'EAU**

=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
EN EAU**

**LICENCE PROFESSIONNELLE EN HYDROLOGIE
QUANTITATIVE (LPH)**

**Mémoire de fin de formation pour l'obtention de la Licence
Professionnelle en Hydrologie Quantitative**

**VARIATION CENTENNALE DU CLIMAT AU
BENIN**

Présenté par :

BOKOSSA Esther Jeannine

Mention : Excellente

Jury

Président : Dr AKOWANOU Onésime

Membres : Dr ZANDAGBA Josué

Ing. BESSOU Joseph



Année académique : 2023-2024

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mon cher père BOKOSSA Bertin Crespo

Vous qui avez tout mis en œuvre pour favoriser mon ascension intellectuelle, votre sagesse et votre soutien inconditionnel sont mes plus grands trésors. Ce travail est le fruit de vos sacrifices. Que Dieu vous bénisse au-delà de ce que vous méritez.

A ma chère mère TOSSOU Rachel Clarisse

À ma merveilleuse mère, dont les précieux conseils ont illuminé chaque étape de mon parcours. Votre soutien indéfectible et votre sagesse éclairée ont été mes guides constants. Je suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous m'avez enseigné. Que Dieu vous bénisse abondamment.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma gratitude.

En premier lieu, je rends grâce à Dieu le Tout-puissant qui dans sa miséricorde a été avec moi et m'a accordée une parfaite santé tout au long de ce travail.

Je voudrais ensuite remercier, mon maître de mémoire Dr HOUNGUE Rita, chercheur à l'institut nationale de l'eau (INE) pour sa patience, sa disponibilité et surtout pour ses judicieux conseils, qui ont alimenté ma réflexion.

Je remercie mon maître de stage, Monsieur BESSOU Joseph, Ingénieur Agrométéorologue à l'Agence National de la Météorologie Bénin (METEO-BENIN) pour sa disponibilité malgré ses différentes occupations, pour toute son implication tout au long de ce travail.

Je remercie tous les enseignants de l'Institut National de l'eau (INE) principalement ceux du département d'hydrologie et gestion des ressources en eau (HGRE) pour leurs efforts en vue de nous transmettre le savoir.

Je remercie tous les agents de METEO-BENIN pour avoir facilité la réalisation de ce travail à leur cotés.

Je remercie mes frères et sœurs pour leur soutien sans faille.

Je remercie tous les camarades étudiants de ma promotion pour tous les moments inoubliables de labeurs et d'amitiés passés ensemble durant ces trois ans de formation

Je remercie les membres du Jury pour l'honneur que vous nous faites de juger ce travail pour l'amélioration de sa qualité.

Enfin je remercie tous ceux qui, de quelques manières, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Cette étude porte sur la variation centennale du climat au Bénin, un pays d'Afrique de l'Ouest marqué par une forte variabilité climatique. L'objectif principal est d'étudier la variation des différents paramètres climatiques au Bénin depuis le début des observations météorologiques dans les six stations synoptiques. De façon spécifique, il a été question de déterminer la variation centennale des paramètres climatiques, d'analyser les tendances des paramètres climatiques et de déterminer les changements observés depuis le début des observations. Pour cela, nous avons utilisé les données de précipitations et de températures (maximales et minimales) de six stations synoptiques du Bénin (Cotonou, Bohicon, Savè, Parakou, Kandi, Natitingou) sur une période allant de 1921 à 2023 pour la plupart. Divers outils de traitement de données et de rédaction ont été utilisés. Il s'agit du logiciel R, QGIS, Surfer et Word. Les tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt ont été utilisés pour identifier respectivement les tendances et les ruptures dans les séries chronologiques des paramètres climatiques. De plus, les indices tels que l'indice de concentration des précipitations (ICP) et l'indice standardisé des précipitations (ISP) ont été utilisés pour analyser la variabilité des paramètres climatiques. Au terme des analyses, il est à noter qu'au Bénin la variabilité climatique est caractérisée par une alternance des années humides et sèches pour les précipitations et une alternance voire une succession des années chaudes et froides pour les températures suivies d'une augmentation des températures maximales et minimales au niveau de toutes les stations synoptiques. La température maximale a augmenté de façon significative de 0,73°C à Cotonou et de 1,05°C à Savè et la température minimale respectivement de 0,94°C et de 0,85°C. Dans ces deux stations, les précipitations ont baissé de 9,53% à Cotonou et de 44,24% à Savè. Comme record sur la période de 1921 à 2023, on peut citer qu'à Parakou, le jour le plus chaud a été le 31 Mars 2007 (41,6°C) et le plus froid le 29 Novembre 2022 (12°C). Parlant de l'évolution des isohyètes sur les normales climatologiques (1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020), on ne note pas un glissement du Sud au Nord ou du Nord au Sud.

Mots clés : Climat, Centennale, Bénin

Abstract

This study focuses on the centennial variation of the climate in Benin, a West African country marked by high climate variability. The main objective is to study the variation of different climatic parameters in Benin since the beginning of the meteorological observations. Specifically, the centennial variation in climate parameters was determined, analyzing trends in climate parameters and determining the changes observed since the beginning of the observations. To do this, we used precipitation and temperature data (maximum and minimum) from the six synoptic stations in Benin (Cotonou, Bohicon, Savè, Parakou, Kandi, Natitingou) over a period ranging from 1921 to 2023 for the most part. Various data processing and drafting tools were used. These are the R, QGIS, Surfer and Word software. Statistical tests such as the Mann-Kendall and Pettitt tests were used to identify trends and breaks in the time series of climate parameters, respectively, and indices such as the Precipitation Concentration Index (PCI) and the Standardized Precipitation Index (SPI) were used to analyze the variability of climate parameters. At the end of the analysis, it was noted that in Benin, climate variability is characterized by an alternation of wet and dry years for rainfall and an alternation or even a succession of hot and cold years for temperatures, followed by an increase in maximum and minimum temperatures at all synoptic stations. Indeed, for example, the maximum temperature increased significantly by 0.73°C in Cotonou and 1.05°C in Savè and the minimum temperature by 0.94°C and 0.85°C respectively. In these two stations, rainfall fell by 9.53% in Cotonou and 44.24% in Savè. As a record, we can mention that in Parakou, the hottest day was March 31, 2007 (41.6°C) and the coldest on November 29, 2022 (12°C). Speaking of the evolution of isohyets on climatological normals (1971-2000, 1981-2010 and 1991-2020), there is no shift from South to North or from North to South.

Keywords : Climate, Centennial, Benin

Listes des sigles et acronymes

GIEC	:	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
CCNUCC	:	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
IPS	:	Indice des Pluies Standardisées
ICP	:	Indice de Concentration des Précipitations
OTHU	:	Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine
RGPH	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitation
MOA	:	Mousson Ouest Africaine
IGN	:	Institut Géographique National
OMM	:	Organisation Météorologique Mondiale

Listes des figures

<i>Figure 1 : Situation géographique et localisation des stations synoptiques du Bénin</i>	10
<i>Figure 2 : Diagramme ombrothermique des stations synoptiques de Cotonou, de Parakou et de Savè</i>	11
<i>Figure 3 : Distribution des précipitations aux six stations synoptiques du Bénin.</i>	17
<i>Figure 4 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Cotonou</i>	18
<i>Figure 5 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Bohicon</i>	19
<i>Figure 6 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Savè</i>	20
<i>Figure 7 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Parakou</i>	21
<i>Figure 8 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Kandi</i>	22
<i>Figure 9 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Natitingou</i>	23
<i>Figure 10 : Evolution des isohyètes pour trois normales climatologiques</i>	30

Listes des tableaux

<i>Tableau 1 : Situation géographique et début d'observation aux 6 stations synoptiques étudiées</i>	12
<i>Tableau 2 : ISP et signification</i>	14
<i>Tableau 3 : Tau de Mann Kendall et signification</i>	14
<i>Tableau 4 : Résultat du test de Mann-Kendall pour les séries annuelles de pluie et de température sur la période de 1921-2023</i>	24
<i>Tableau 5 : Résultat du test de Pettitt pour les séries annuelles de pluie et de température sur la période de 1921-2023</i>	26
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des résultats de l'écart entre moyenne des températures avant et après rupture et de l'écart relatif entre la moyenne des précipitations avant et après rupture.</i>	27
<i>Tableau 7 : Tableaux récapitulatifs des records climatiques atteints aux six stations synoptiques depuis le début des observations.</i>	29

Sommaire

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Listes des sigles et acronymes</i>	<i>v</i>
<i>Listes des figures</i>	<i>vi</i>
<i>Listes des tableaux</i>	<i>vii</i>
<i>Sommaire</i>	<i>ix</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
1. Contexte, justification du sujet et problématique	1
2. Revue de littérature	2
3. Objectifs de l'étude	6
4. Hypothèses	7
<i>Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes</i>	<i>9</i>
1.1 MILIEU D'ETUDE	9
1.2 METHODOLOGIE	12
<i>Chapitre 2 : Résultats et discussion</i>	<i>17</i>
2.1 RESULTATS	17
2.2 DISCUSSIONS	31
<i>CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS</i>	<i>33</i>
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	<i>34</i>
<i>ANNEXES</i>	<i>36</i>

Introduction Générale

1. Contexte, justification du sujet et problématique

Le climat est l'ensemble des conditions météorologiques d'une région ou d'un lieu sur une longue période. Il correspond, au sens étroit du terme, au « temps moyen ». C'est donc une description statistique en fonction de la variabilité des périodes et de la moyenne. En d'autres termes, c'est une tendance météorologique établie pour une région à partir des moyennes de plusieurs paramètres sur une longue période de temps (au moins 30 ans). Au nombre de ces paramètres, on peut citer les températures, l'insolation, les précipitations, humidité relative, vents et pression atmosphérique.

Le climat sur le globe n'est pas uniforme. En effet, selon le tableau de classification de Koppen, il existe plusieurs types de climat à savoir climat tropical, climat sec, climat tempéré, climat continental et climat polaire. Ces différents types de climat sont susceptibles de subir des variations parfois induites par les paramètres climatiques.

Plusieurs études ont été réalisées sur les variations du climat. Par exemple, Sylla et al. (2015) ont analysé des projections climatiques pour l'Afrique de l'Ouest en utilisant des modèles climatiques régionaux, révélant une augmentation significative de la température et une variabilité accrue des précipitations. Dans cette période, nous avons eu Amoussou E., et al. (2016) qui ont étudié l'évolution climatique au Bénin de 1950 à 2010 et son influence sur les eaux de surface. De leur côté, Chabi et al. (2014) ont analysé la variabilité spatio-temporelle du mois de Janvier au Bénin. Dossou et al. (2021) ont étudié les tendances climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau au Bénin, mettant en évidence des changements notables dans les régimes de précipitation et leurs implications pour la gestion des ressources hydriques. De même, plus récemment Oyede et al., 2022 ont étudié les caractéristiques Spatio-temporelles de la variabilité climatique au Bénin de 1960 à 2021. De telles études permettent de comprendre les tendances et les anomalies climatiques, et d'évaluer les impacts potentiels sur les différentes régions du Bénin. Comprendre et prédire ces variations annuelles, décennales ou multi-décennales dans un passé récent est devenu un défi pour les spécialistes africains du climat (Gnangle et al., 2011). Idrissou et al. (2020) l'ont fait sur les 50 dernières années.

Ainsi, peu d'études au Bénin ont été réalisées en utilisant une large période couverte par les données climatiques. De ce fait, l'étude des paramètres climatiques sur une période plus étendue

permettra de mettre en évidence des tendances à long terme et de fournir des informations cruciales pour la prise de décisions relatives à la variabilité et aux changements climatiques.

En effet, les observations météorologiques au Bénin, ont démarré il y a une centaine d'années. La plupart des stations synoptiques selon la base de données de METEO BENIN ont été installées en 1921 et fonctionnent jusqu'à ce jour. Alors, il convient de se pencher sur une étude centennale du climat en utilisant les données collectées sur les principales stations synoptiques afin de déceler les variations du climat induites par l'évolution des différents paramètres climatiques mesurés depuis le début des observations. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude intitulée « **Variation centennale du climat au Bénin** ».

Plusieurs questions ont motivé cette étude et méritent d'être posées. Parmi elles on peut citer :

- ✓ Quelles sont les variations connues par le climat depuis le début des observations ?
- ✓ Quelles sont les tendances des paramètres climatiques depuis le début des observations ?
- ✓ Quels sont les changements du climat observés depuis le début des observations ?
- ✓ Quels sont les records de variabilité atteints par chaque paramètre climatique depuis le début des observations météorologique à ce jour ?

2. Revue de littérature

2.1. Clarification conceptuelle

- **Variabilité climatique** : est une caractéristique inhérente au climat qui se manifeste par des changements et déviations dans le temps (GIEC, 2014). Elle est une modification naturelle du climat et donc indépendante des activités humaines.
- **Changement climatique** : Selon la convention cadres des Nations Unies sur les changements Climatiques (CCNUCC, 1992), les changements climatiques sont attribués directement ou indirectement aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui vient s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables.
- **Climat** : Le climat caractérise l'état moyen de nombreux paramètres, principalement physiques, de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales.
- **Tendance** : C'est un changement graduel dans les propriétés d'une variable aléatoire traduisant la variabilité intrinsèque des séries hydrologiques et climatiques.

2.2. Etat de connaissance

La question sur la variation ou changement du climat a été souvent posée et plusieurs fois débattue. Elle représente un sujet qui rassemble assez de scientifiques à travers le monde. Ainsi, plusieurs études ont porté sur la variabilité et les changements climatiques.

A l'échelle du globe, il a été observé une hausse de la température moyenne de l'atmosphère de 0,7 °C (GIEC, 2007) accompagnée d'une variabilité accrue de phénomènes tels que les sécheresses, des inondations extrêmes, la perte de la fertilité des sols, de faibles productions agricoles (cultures et élevage), la perte de biodiversité, le risque de stress hydrique et la prévalence de diverses maladies (Gemed et al., 2015). La variabilité climatique ne s'observe pas de la même manière dans le monde. Par exemple, parlant de la variabilité pluviométrique, entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'Est d'Amérique du Nord et du Sud, dans le Nord de l'Europe et dans le Nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie du sud de l'Asie (GIEC, 2007).

A l'échelle du continent Africain le taux d'élévation des températures, d'environ +0,3 °C par décennie de 1991 à 2021, est plus rapide que la moyenne mondiale. Selon le Sommet africain sur le climat, les pays africains sont parmi les plus vulnérables aux effets des changements climatiques, subissant les conséquences désastreuses de la crise climatique, notamment la sécheresse, les inondations, les températures extrêmes et l'élévation du niveau de la mer. En Afrique, 2021 s'est classée entre la troisième et la quatrième année la plus chaude jamais relevée en Afrique. Les chutes de pluies présentent en Afrique une forte variabilité et sont influencées par des facteurs tels que El Niño, La Niña, les dipôles de l'océan Atlantique et de l'océan Indien et l'oscillation atlantique multidéennale. Des conditions plus sèches que la normale ont régné sur une bonne partie du nord et de l'est de l'Afrique, du Nigéria, du sud-ouest du Cameroun, du centre du Tchad, du sud de la République démocratique du Congo, de l'est de l'Angola, du nord du Botswana, de la Zambie, du Zimbabwe, du Malawi, du centre du Mozambique, de Madagascar et de zones isolées des côtes de l'Afrique du Sud.

À l'inverse, des précipitations supérieures à la moyenne se sont produites dans certaines parties de la Guinée, au Libéria, au Sud du Tchad, au Nord du Cameroun, dans certaines parties de la République centrafricaine, dans une grande partie de la République démocratique du Congo, au Burundi, dans l'Ouest de la Tanzanie, dans l'Ouest de l'Angola, dans une grande partie de la Namibie, au Sud-Est du Botswana, dans certaines parties de l'Afrique du Sud et au Nord et au sud du Mozambique.

A l'échelle nationale, le Bénin est l'un des pays de l'Afrique de l'Ouest qui n'est pas exempté des variations que connaît le climat. Ainsi, plusieurs études ont documenté les changements observés au Bénin et leurs impacts sur les conditions météorologiques et les écosystèmes locaux. Gnangle et al. (2011) ont étudié les tendances climatiques et leurs impacts sur les productions agricoles dans les régions du Bénin. Leur recherche a mis en évidence une augmentation des températures et des variations pluviométriques significatives au cours des dernières décennies. Cela montre une tendance qui peut menacer la sécurité alimentaire dans un pays où l'agriculture est un pilier de l'économie. En effet, l'augmentation des températures peut réduire les rendements agricoles tandis que la variation pluviométrique peut entraîner des périodes de sécheresse ou des inondations. Selon Idani et al. (2013) les décennies 1970 et 1980 au Bénin, ont été marquées par une baisse considérable des précipitations et une sécheresse sévère. Les études ont révélé une instabilité des saisons de pluie avec des conséquences sur le secteur agricole et l'approvisionnement en eau. Le réchauffement thermique étant une composante critique du changement climatique, est récurrent au Bénin. L'instabilité des régimes pluviométriques est une caractéristique notable de la variabilité climatique au Bénin. Amoussou (2010) a étudié les fluctuations pluviométriques dans le bassin versant de l'Ouémé et leurs impacts hydrologiques. Ses travaux ont montré une variabilité importante des précipitations annuelles et saisonnières. Ces fluctuations pouvant avoir des impacts profonds sur les écosystèmes aquatiques et les activités humaines dépendant de l'eau. Par exemple des précipitations irrégulières peuvent entraîner des périodes de sécheresse suivies de fortes pluies. La variabilité climatique au Bénin induit une augmentation de la température moyenne, une forte variabilité de la pluviométrie et l'augmentation de l'occurrence des conditions extrêmes telles que les inondations et les sécheresses (Djohy, 2016). La répartition inégale des pluies se traduit entre autres par une diminution du nombre d'événements pluvieux, un nombre élevé des épisodes secs, l'apparition d'événements extrêmes, des débuts tardifs et des fins précoces de pluies dans un contexte de réchauffement thermique (Oyede, 2019).

De façon générale, l'ensemble des études a ressorti des augmentations de température, de baisses non significatives des précipitations avec des variations interannuelles à la hausse. Cependant, ces études n'ont pas été réalisées avec une longue série de donnée comme le suggère notre étude intitulée « **Variation centennale du climat au Bénin** ».

Afin d'obtenir ces résultats d'analyses, les scientifiques ont recours à des méthodes scientifiques variées.

2.2.1 Méthode d'analyse de variation des paramètres

Diverses méthodes d'analyse sont disponibles pour analyser ces données, chacune présentant ses propres avantages et contraintes. Les outils de modélisation, de visualisation, d'analyse statistique et d'analyse multivariée peuvent être employées individuellement ou conjointement afin de réaliser une analyse exhaustive et approfondie des données climatiques. Plusieurs autres scientifiques ont utilisé la méthode de l'indice de Lamb ou indice standardisée des précipitations (ISP) qui est souvent appliquée pour analyser l'évolution de la pluviométrie. Selon Oyede et al. (2022) cet indice permet de comprendre la variation interannuelle des paramètres climatiques. De plus, il a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires en pluviométrie. Une autre méthode pour étudier la variation des données de pluies sur une période, nous avons l'indice de concentration des précipitations ICP proposé par Olivier (1980). Cet indice, donne une explication sur le niveau de concentration des précipitations au cours d'une année (saison) donnée. Il est utilisé à travers le monde par des chercheurs scientifiques (Alijani B, O'Brien J, Yarnal B, 2008; Apaydin H., Erpul G., Bayramin I., Gabriels D, 2006)

2.2.2 Méthode de détermination des tendances

Afin d'analyser les tendances dans une série climatique, plusieurs méthodes sont utilisées. Parmi celles-ci, nous avons le test de Mann-Kendall qui permet d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique. D'après OTHU, 2011, le test de Mann-Kendall (Mann et Whitney, 1947) est un test statistique dit non paramétrique car il ne fait aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données. En particulier, il s'applique à des données n'ayant pas une distribution gaussienne. Il est donc adapté aux données hydrométéorologiques pour lesquelles les distributions sont souvent dissymétriques. La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par Yue et al (2004). Dans le cas de variables auto-corrélées, le test de Mann-Kendall doit être modifié pour prendre en compte l'effet de l'autocorrélation (Yue et Wang, 2004 ; Renard, 2006 ; Renard et al, 2006). L'application du test de tendance de significativité de Mann-Kendall et de correction de la pente de Sen est nécessaire à l'aide d'une démarche statistique ou d'une application. (Doukpolo, 2013)

2.2.3 Méthode de détermination des points de ruptures

La détection des points de rupture dans les séries climatiques et hydrologiques est essentielle pour comprendre l'évolution des régimes météorologiques, dans une région particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Plusieurs études récentes ont appliqué divers tests dans ce contexte. Le test de Pettitt a été largement utilisé pour identifier les changements brusques dans les séries de précipitations. Par exemple, Lawin et al. (2019) ont appliqué ce test pour analyser les changements dans les précipitations annuelles au Bénin, révélant des ruptures importantes liées à la variabilité climatique. Le test de Buishand a été utilisé par Soro et al. (2020) pour identifier les points de rupture dans les séries de précipitations au Burkina Faso, fournissant des informations sur les changements dans les régimes hydrologiques. Le test CUSUM, qui permet de détecter des changements progressifs, a été employé par Zongo et al. (2016) pour analyser les tendances des précipitations dans le bassin du fleuve Niger, identifiant des ruptures subtiles dans la variabilité climatique. Enfin, le test de Bai-Perron, reconnu pour sa capacité à détecter plusieurs points de rupture, a été utilisé par Afouda yabi J. et al., (2020) pour analyser les changements dans les séries de température et de précipitations au Bénin, mettant en évidence plusieurs phases de transition climatique. Ces études montrent l'importance de ces méthodes dans la compréhension des changements climatiques en Afrique de l'Ouest, où les années de rupture dans les séries climatiques sont liés à des phénomènes comme la variabilité des moussons et les sécheresses prolongées.

Dans cette étude, nous avons opté pour l'utilisation de l'indice de concentration des précipitations ICP et l'indice standardisé des précipitations ISP (indice de Lamb) pour l'évaluation de la répartition des paramètres de précipitations et pour l'évaluation de la variation des températures l'ISP. Ensuite, pour l'analyse des tendances nous avons opté pour le test de Mann-Kendall. Et pour déterminer les changements observés, le test de Pettitt, qui permettra de déterminer les points de ruptures dans les séries temporelles des paramètres climatiques.

3. Objectifs de l'étude

En apportant des réponses aux questions de recherche mentionnées plus haut, la présente étude a pour objectif d'étudier la variation centennale du climat au Bénin en se basant sur les données climatiques collectées au niveau des six stations synoptiques.

Il s'agit de façon spécifique de :

- ✓ Déterminer la variation centennale des paramètres climatiques.

- ✓ Analyser les tendances des paramètres climatiques.
- ✓ Déterminer les changements observés.

4. Hypothèses

Les hypothèses découlant de ces objectifs sont les suivantes :

- Les paramètres climatiques ont connu des variations depuis le début des observations.
- Du début des observations à ce jour, les paramètres climatiques ont connu des tendances significatives.
- Des changements ont été observés sur chaque paramètre depuis le début des observations jusqu'à ce jour.

Cette recherche a été structurée en deux chapitres. Le premier chapitre concernera la zone d'étude ainsi que les données et méthodes utilisées et le second exposera les résultats et discussions

**CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET
METHODES**

Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes

Ce chapitre vise à présenter de manière succincte et pertinente le milieu d'étude qui constitue le cadre de notre recherche et la méthodologie utilisée pour cette étude. Connaître le cadre d'étude est primordiale et constitue un élément sans lequel aucune étude ne peut être faite. Cette présentation rassemble les éléments conduisant à la connaissance du Bénin, des six stations synoptiques au Bénin, des outils et méthodes exploitées pour l'atteinte des objectifs fixés.

1.1 MILIEU D'ETUDE

1.1.1 Localisation géographique du Bénin et des stations synoptiques

Le Bénin (Figure 1), est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer (entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude est) et couvre une superficie de 114.763 km² avec une population d'environ 10.008.749 habitants (RGPH, 2015). Il est limité au nord-est par la République du Niger sur 277 km avec 120 km délimités par le fleuve Niger, au nord-ouest par le Burkina Faso (sur 386 km), à l'ouest par le Togo (sur 651 km), à l'est par le Nigeria (sur 809 km) et au sud par l'océan Atlantique (sur 121 km). Administrativement, le Bénin comporte douze départements (l'Atacora, la Donga, le Borgou, l'Alibori, l'Atlantique, le Littoral, le Mono, le Couffo, l'Ouémé, le Plateau, le Zou et les Collines) et 77 communes comportant des villages et des quartiers. Le Bénin présente une diversité géographique qui influence ses conditions climatiques. En effet, cette diversité se reflète dans la répartition des stations synoptiques à travers le pays, lesquelles permettent de recueillir des données météorologiques (Figure1).

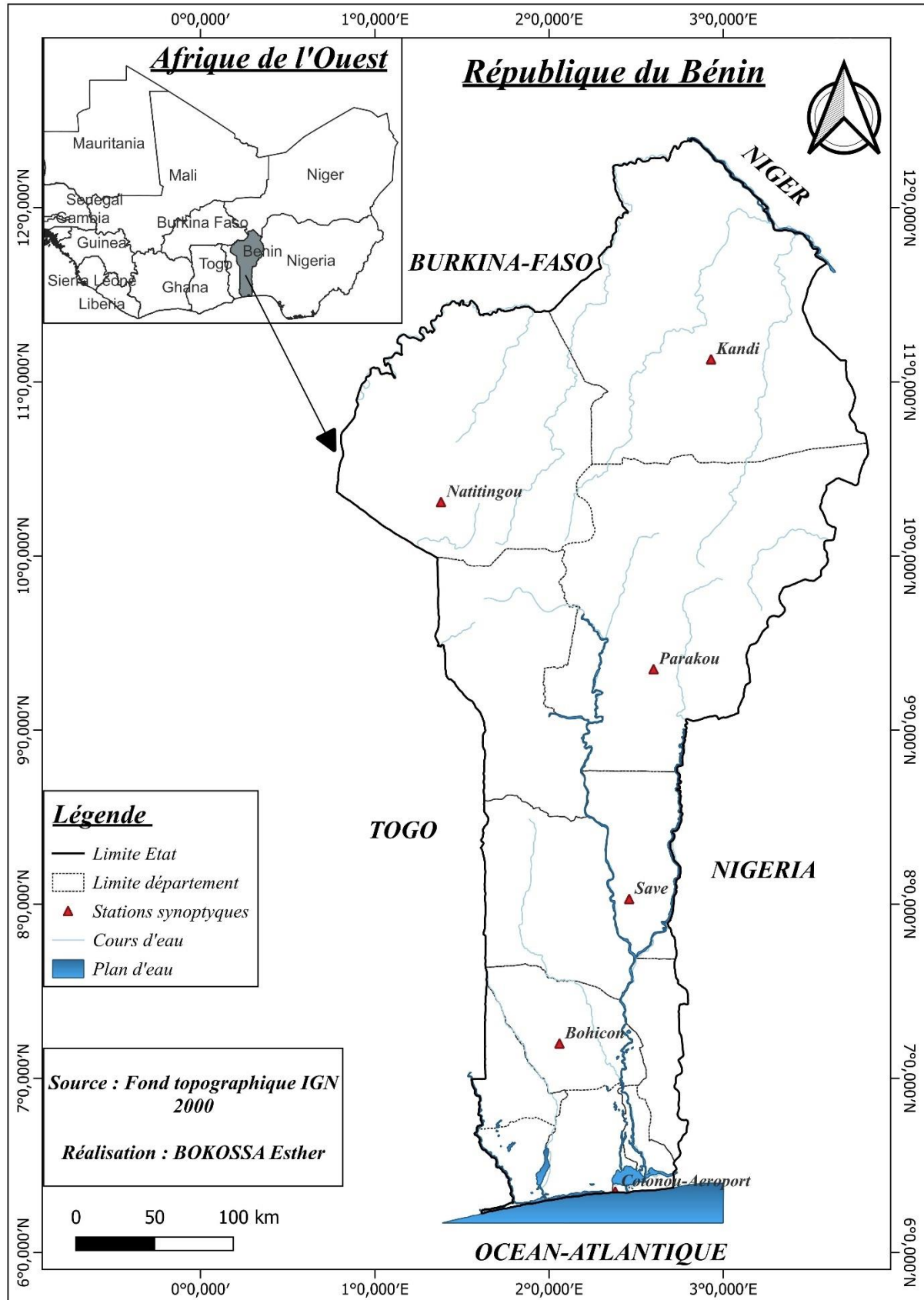


Figure 1 : Situation géographique et localisation des stations synoptiques du Bénin

1.1.2 Climat

Le Bénin se situe dans une région intertropicale, où son climat est largement influencé par la Mousson Ouest-Africaine (MOA). Au sud, le climat est de type subéquatorial, caractérisé par deux saisons de pluies et deux saisons sèches. Dans cette région du Benin, comme l'indique le diagramme ombrothermique de Cotonou (figure 2), les mois les plus pluvieux sont juin et octobre respectivement pour la grande saison et la petite saison et le mois d'août, mois le plus froid, marque la petite saison sèche. Le Centre est caractérisé par un climat de transition qui chevauche entre le climat du sud et du nord comme le montre le diagramme ombrothermique de Savè sur la Figure 2. L'impact de la mousson est moins marqué dans le Nord du pays, où les masses d'air sec de l'alizé saharien résident plus longtemps lors de leur progression vers les zones septentrionales de la sous-région ouest-africaine, et les masses d'air humides atteignent leur latitude maximale généralement en août, mois à partir duquel elles commencent à reculer et cèdent la place à l'alizé du nord-est (harmattan). Cette dynamique confère à cette région un climat de type tropical continental avec une seule saison des pluies et une seule saison sèche. Par exemple pour la station de Parakou au nord (figure 2), le mois le plus pluvieux est septembre et les mois les plus chauds sont février, mars et avril.

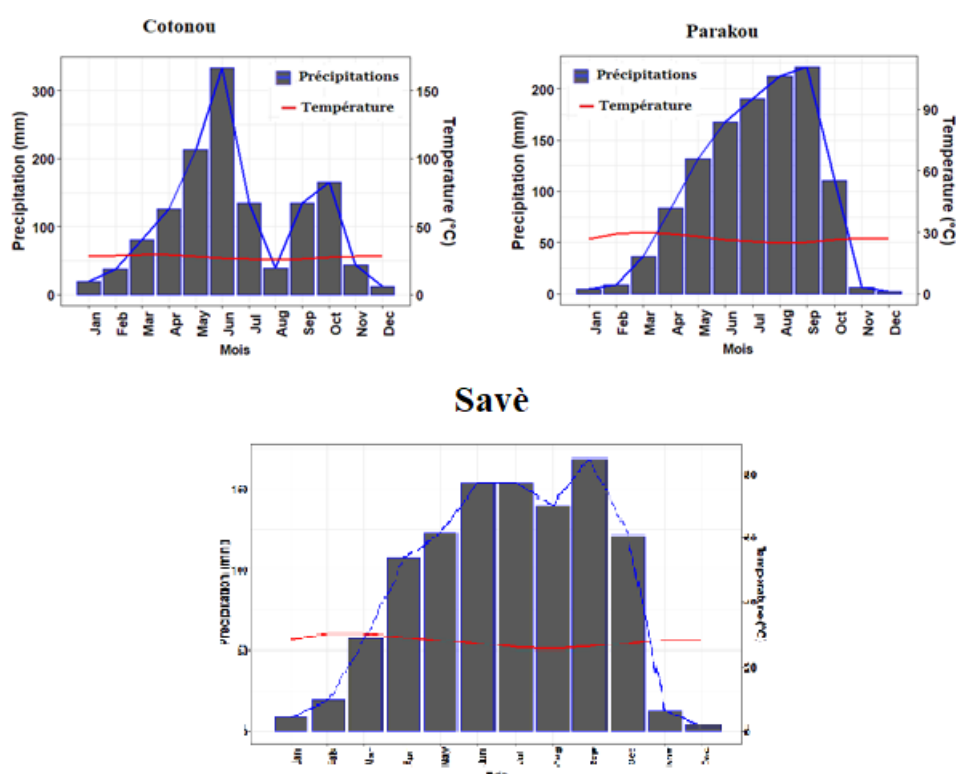


Figure 2 : Diagramme ombrothermique des stations synoptiques de Cotonou, de Parakou et de Savè

1.2 METHODOLOGIE

Dans la réalisation de ce travail, des recherches bibliographiques (Support de cours, bibliothèque, internet), des collectes de données et le traitement de ces données ont été faites dans l'intention d'atteindre les objectifs fixés.

1.2.1 Données

Les données utilisées sont les précipitations et températures maximales et minimales enregistrées depuis le début des observations aux six stations synoptiques issues de l'Agence Nationale de la Météorologie à savoir Cotonou, Bohicon, Savè, Parakou, Kandi et Natitingou. (Voir tableau 1).

Tableau 1 : Coordonnées géographique et début d'observation aux 6 stations synoptiques étudiées

Stations	Longitude(E)	Latitude(N)	Période d'Ouverture	Période considérée
Cotonou	2.38	6.35	1952	1952-2023
Bohicon	2.06	7.20	1940	1940-2023
Savè	2.46	8.03	1921	1921-2023
Parakou	2.6	9.35	1921	1921-2023
Kandi	2.93	11.13	1921	1921-2023
Natitingou	1.38	10.31	1921	1921-2023

1.2.2 Outils

Pour la conduite de ce travail, les outils suivants ont été utilisés :

- R 4.4.1 : Pour le traitement des données.
- Surfer 16 : Pour la spatialisation des normales climatologiques.
- Qgis : Pour la cartographie de la zone d'étude.
- Word : Pour la rédaction du document.

1.2.3 Méthode de traitements et d'analyse des données

1.2.3.1 Variation centennale des paramètres climatiques

Plusieurs méthodes dans la littérature permettent d'étudier les variations des paramètres climatiques. Dans ce document, l'indice de concentration des précipitations (ICP) et l'indice Standardisé des précipitations (ISP) ont été utilisés. En effet, pour les précipitations, l'ICP permet de caractériser la distribution des précipitations dans une région au cours d'une période donnée et pour une échelle donnée. Déjà, il a été utilisé par plusieurs auteurs ((Alijani B, O'Brien J, Yarnal B, 2008; Apaydin H., Erpul G., Bayramin I., Gabriels D, 2006) pour analyser la distribution spatiale des précipitations. Dans ce document, l'ICP a été calculé pour une échelle annuelle. La formule ci-dessous a été utilisée à cet effet.

$$\text{ICP} = \frac{100 \cdot (\sum_m Pr_m^2)}{(\sum_m Pr_m)^2} \quad (1)$$

Où Pr_m est le cumul des précipitations pour le mois m . Selon (Patrick Grennier, 2020) une valeur $\text{ICP} \leq 10$ indique une répartition relativement uniforme, pour $10 < \text{ICP} \leq 15$, on a une répartition modérément uniforme, pour $15 < \text{ICP} \leq 20$ on a une répartition irrégulière et pour une valeur d' $\text{ICP} > 20$, indique une répartition très irrégulière.

Quant à l'ISP il a été utilisé pour caractériser la variabilité interannuelle des précipitations afin de déceler les années humides, sèches et normales, Il se calcul de la façon suivante :

$$\text{ISP} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

Où x_i est la valeur annuelle dans l'année i pour le paramètre considéré ; $\bar{x}$ la moyenne annuelle, calculée sur la période couverte par les données de chaque station et σ l'écart type de la série. Pour identifier la nature d'une année en fonction des valeurs des IPS obtenus, le tableau 2 ci-dessous a été utilisé.

Tableau 2 : ISP et signification

ISP	Signification
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

Source : (OMM, 2012)

Afin d'analyser la variabilité des températures maximales et minimales, l'IPS a permis de déterminer les années chaudes et froides depuis le début des observations météorologiques.

1.2.3.2 Tendence centennale des températures et des précipitations

Concernant l'étude des tendances des paramètres climatiques (températures et précipitations), le test de Mann-Kendall modifié (Mann & Witney, 1947) a été utilisé. Ce test est non paramétrique car ne donnant pas des hypothèses sur la distribution sous-jacente des données, permet de caractériser une tendance dans une série. Son hypothèse nulle (H_0) est qu'il n'y a pas de tendance contre l'hypothèse (H_1), il y a tendance. La tendance est dite significative d'un point de vue statistique lorsque la p-value du test est inférieure à 5%. Ainsi, si la p-value est inférieure à 5%, les différentes valeurs du coefficient Tau du test selon le tableau ci-dessous (Zade et al., 2023) permettent de prouver le degré de significativité de la tendance.

Tableau 3 : Tau de Mann Kendall et signification

Coefficient Tau de Mann-Kendall	Degré de significativité
> 0,9	Tendance hautement significative
0,7 à 0,9	Tendance significative
0,4 à 0,7	Tendance modérément significative
0,2 à 0,4	Tendance faiblement significative
< 0,2	Tendance non significative

1.2.3.3 Détermination des changements observés

Le test de Pettitt (1979) et celui de comparaison des moyennes de Student ont été utilisés pour évaluer les changements observés dans les séries de données des températures et des précipitations. Les deux tests ont été compilés à l'aide de logiciel R. De plus, certains records c'est-à-dire les valeurs journalières, mensuelles extrêmes enregistrées sur les différentes stations synoptiques depuis le début des observations météorologiques ont été capitalisées dans ce document comme changements observés sans occulter l'analyse des isohyètes pluviométriques sur trois périodes normales climatologiques de référence définies par l'OMM. En effet, lorsqu'une rupture est significativement identifiée et le test de Student révèle une différence significative entre les moyennes des sous séries avant et après rupture, le changement observé est déterminé pour la température selon la formule suivante :

$$\text{Ecart} = T2 - T1(3)$$

avec T1 la moyenne de la température annuelle avant rupture et T2 la moyenne de la température annuelle après rupture. Si de plus les conditions sont réunies pour le paramètre précipitation le changement observé est évalué en calculant un écart relatif de la moyenne de la série après rupture par rapport à la moyenne de la série avant rupture. Cet écart est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Ecart relatif} = \frac{Pm2 - Pm1}{Pm1} \times 100 (4)$$

où Pm1 est la moyenne des précipitations annuelles avant rupture et Pm2 la moyenne des précipitations annuelles après rupture.

Analyse de l'évolution des isohyètes

Il a été analysé dans le cadre de ce travail, l'évolution des isohyètes. Afin d'obtenir un résultat plus ou moins représentatif, nous avons utilisé les données pluviométriques de trois périodes normales (1971-2000 ; 1981-2010 ; 1991-2020) de 58 stations pluviométriques de l'agence nationale de la météorologie du Bénin. La méthode utilisée pour analyser les isohyètes est l'interpolation des cumuls pluviométriques annuels des différentes stations par la méthode de krigeage en optant pour un modèle de variogramme linéaire dans le logiciel surfer.

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 2 : Résultats et discussion

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats ainsi que la discussion. Les principaux résultats obtenus sont représentés entre autres par des graphiques explicites et des tableaux suivis d'une description. Ils ont été obtenus suite à la mise en œuvre de la méthodologie élaborée précédemment. A ces résultats suivra la discussion qui infirmera ou confirmera les hypothèses énoncées au début de cette étude et proposera des améliorations aux méthodologies exécutées et des recommandations pratiques pour limiter les effets de la variation du climat.

2.1 RESULTATS

2.1.1 Variation centennale des paramètres climatiques

2.1.1.1 Indice de concentration des précipitations (ICP)

La distribution des précipitations au Bénin varie d'une station à une autre (figure 3). Dans toutes les stations, on ne note pas des années où les précipitations sont réparties de manière relativement uniforme ($ICP \leq 10$). Cependant, les stations de Cotonou, Natitingou et Parakou enregistrent des années où les précipitations sont irrégulièrement réparties. Dans 75 % des cas, les précipitations ont une répartition modérément uniforme à Bohicon et à Savè et les 25% sont irrégulièrement réparties. Les précipitations aux stations de Cotonou, Parakou et Natitingou sont majoritairement irrégulières sauf quelques valeurs extrêmes éparses. A Kandi, 50% des précipitations sont irrégulièrement réparties tandis que les 50% restants sont très irrégulières.

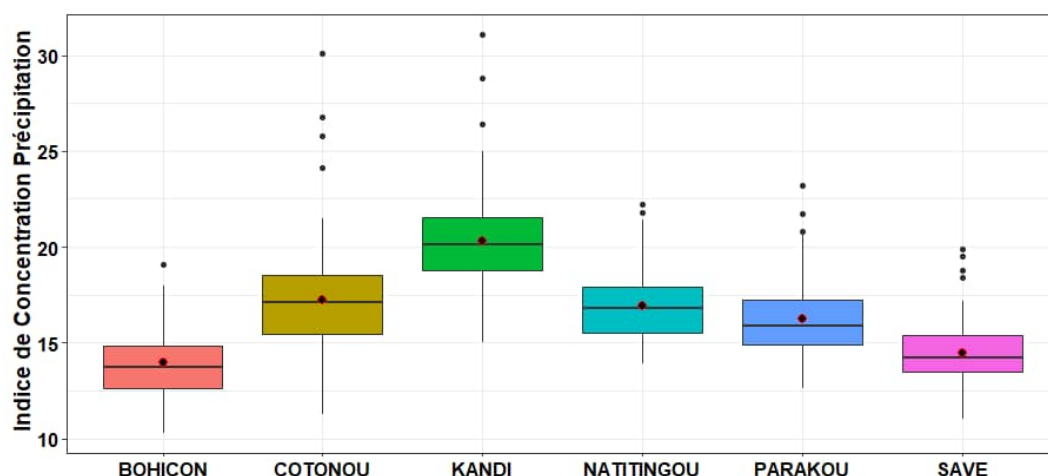


Figure 3 : Distribution des précipitations aux six stations synoptiques du Bénin.

2.1.1.2 Indice des précipitations standardisées (ISP)

L'anomalie des températures maximales et minimales à Cotonou (Figure 4) révèle des tendances similaires. Deux grandes périodes distinctes sont remarquées. De 1952 jusqu'à environ 1984, on observe une majorité d'années froides caractérisées par des anomalies négatives. À partir de 1985, une transition vers des années chaudes devient évidente, marquée par des anomalies positives nettement au-dessus de la moyenne. A partir de 1990, on note une succession des années chaudes (anomalie positive) jusqu'à ce jour.

En ce qui concerne les précipitations (Figure 4), les analyses montrent une alternance entre années humides et années sèches tout au long de la période. De 1952 à 1977, les années sont majoritairement humides, avec des indices de pluie excédentaires. De 1978 à 1985, on observe une succession d'années sèches avec des déficits pluviométriques marqués. Après 1990, la variabilité des précipitations est plus visible, avec des alternances entre années excédentaires et déficitaires, mais les années sèches semblent plus fréquentes dans les décennies récentes, notamment après 2000.

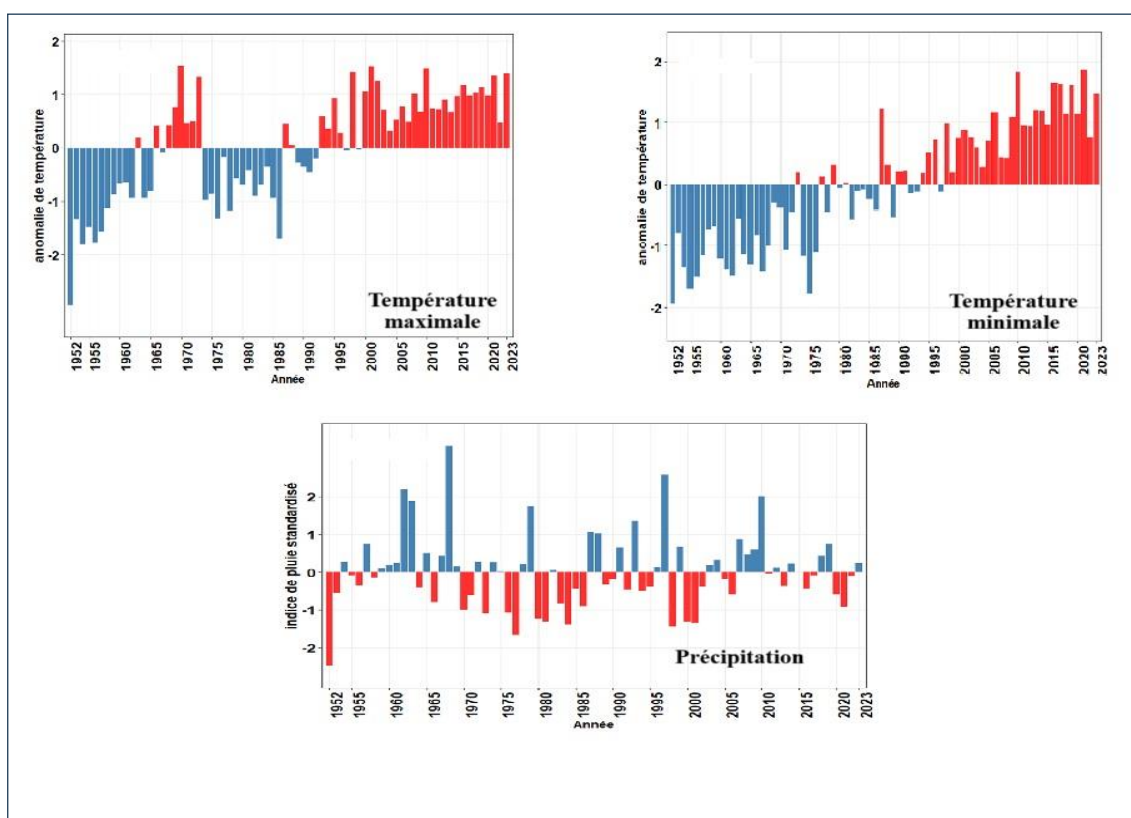


Figure 4 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Cotonou

A la station de Bohicon, deux grandes périodes distinctes sont remarquées avec des tendances similaires entre température maximale et minimale (Figure 5). De 1952 à environ 1975, la majorité des années ont été froides, indiquant que les températures maximales et minimales étaient généralement en dessous de la moyenne. À partir de 1980, les températures deviennent progressivement chaudes, avec une nette augmentation des anomalies positives, traduisant des années où les températures dépassent régulièrement la normale. Cette tendance à la hausse se maintient jusqu'à 2023.

Les précipitations à Bohicon montrent une alternance entre années humides et années sèches tout au long de la période étudiée (Figure 5). Les années 1940 à 1970 sont globalement humides, avec des indices de précipitation excédentaires. À partir de 1971, il y a une période plus instable marquée par une alternance rapide entre années excédentaires et déficitaires, mais les déficits semblent être plus fréquents.

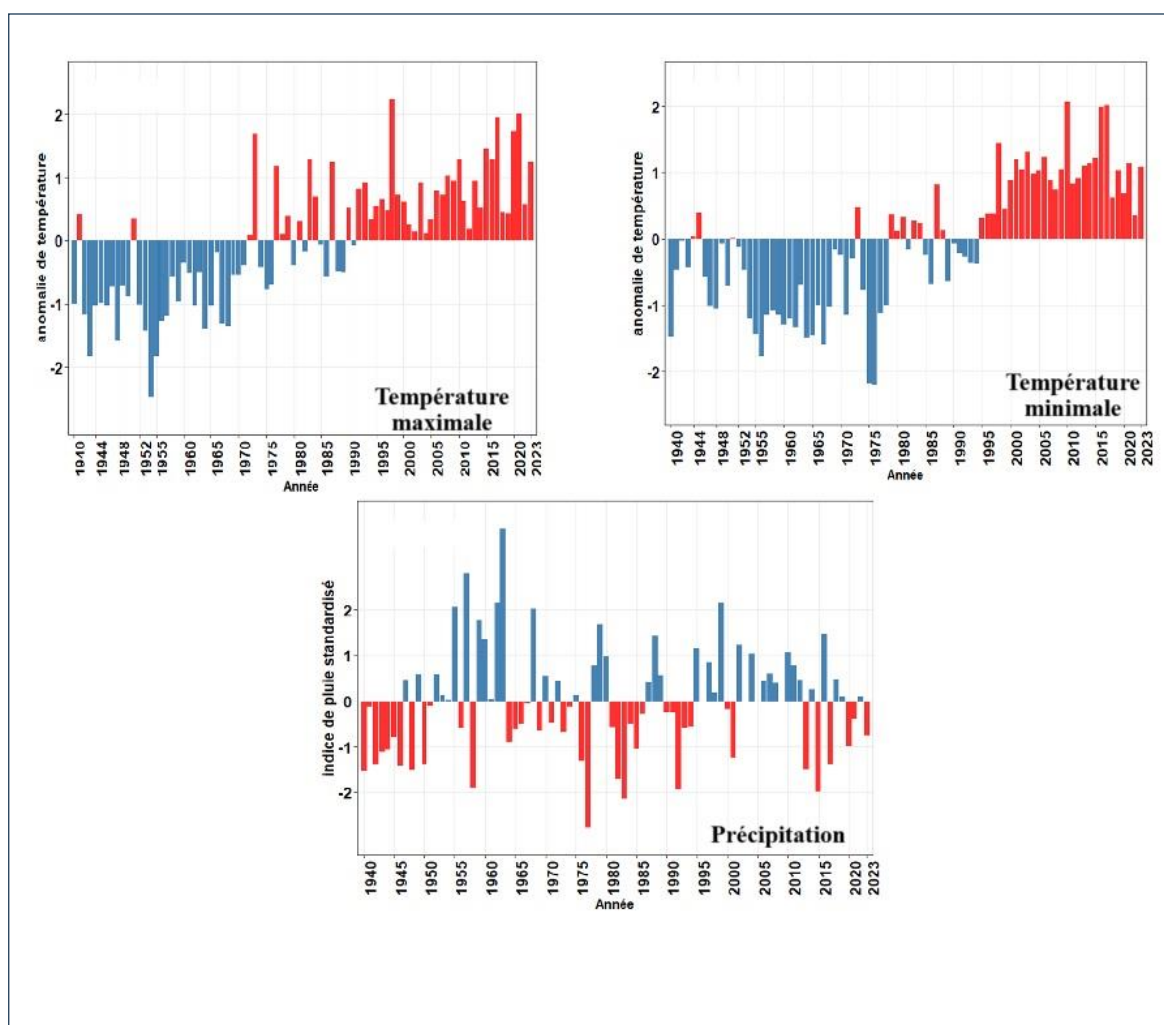


Figure 5 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Bohicon

A la station de Savè (Figure 6) il se dégage deux périodes distinctes pour les températures. Avant 1980, la majorité des années sont froides, avec des anomalies de température majoritairement négatives. À partir des années 1980, une transition vers des années chaudes est évidente surtout à partir des années 2000, avec des anomalies positives devenant dominantes jusqu'en 2023.

Les précipitations à Savè (Figure 6) montrent une alternance entre années humides et années sèches. Entre les années 1921 et 1950, la plupart des années sont humides avec des anomalies de précipitations excédentaires. Cependant, à partir de 1960, on observe une période marquée par une dominance des années sèches, avec de nombreuses anomalies déficitaires par rapport à la normale.

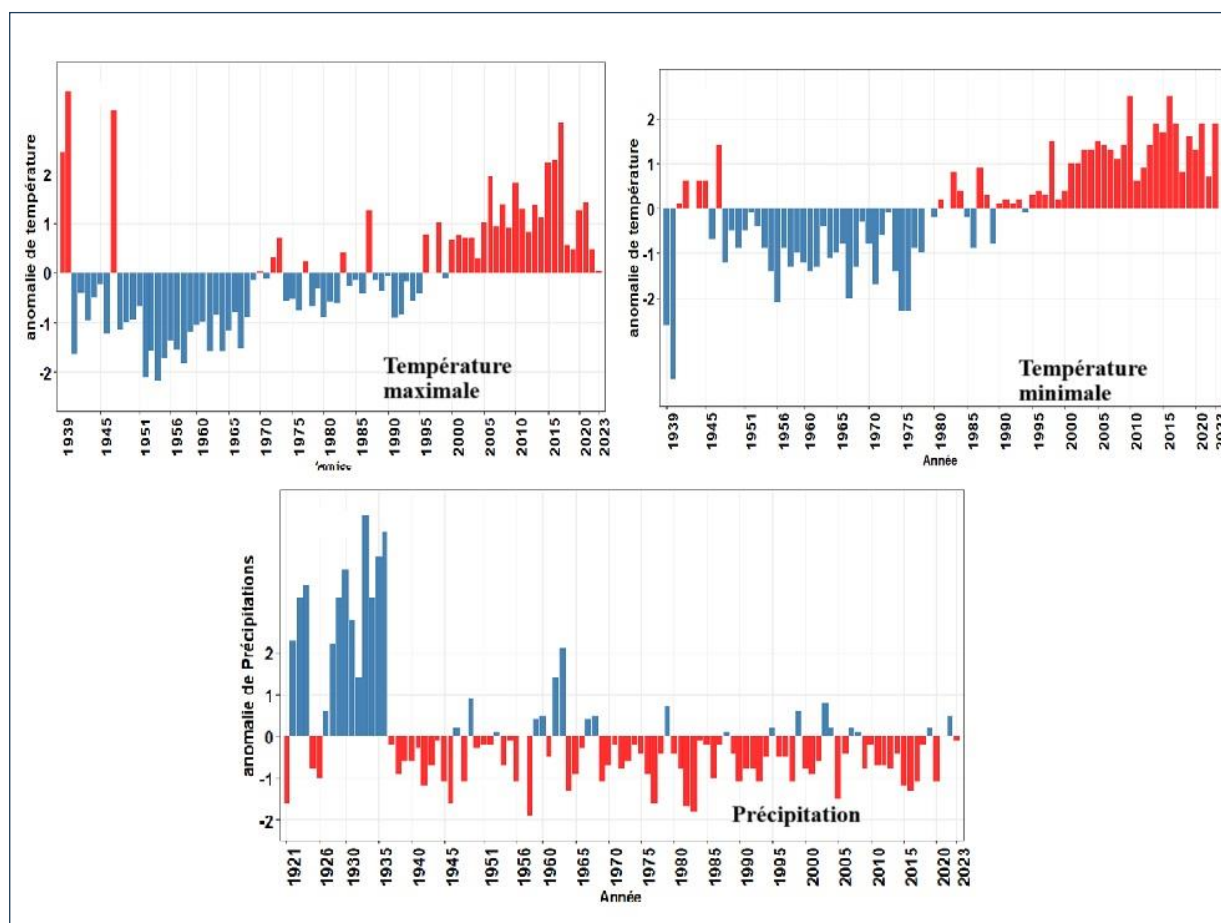


Figure 6 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Savè

L'analyse des températures maximales et minimales à Parakou (Figure 7) montre une évolution similaire, avec deux grandes périodes distinctes. De 1962 à 1993, les années froides dominent, caractérisées par des anomalies négatives pour les deux types de températures, indiquant des valeurs inférieures à la moyenne. À partir de 1994, une transition vers des années chaudes

s'observe, avec des anomalies positives de plus en plus marquées. Ce réchauffement est particulièrement prononcé entre 2005 et 2015, où les températures maximales et minimales connaissent des pics significatifs. Depuis 2016, les températures restent élevées, traduisant une persistance du réchauffement.

Les précipitations dans cette station (Figure 7), montrent une variabilité marquée, avec une alternance entre années humides et années sèches. De 1921 à 1965 environ, les précipitations sont principalement déficitaires. Cette période est globalement sèche avec plusieurs années consécutives de déficit pluviométrique. À partir de 1966, la tendance s'inverse légèrement avec quelques années humides excédentaires, bien que l'on observe encore des périodes sèches occasionnelles. Depuis 2000, les précipitations semblent légèrement plus régulières, avec une alternance entre années excédentaires et déficitaires.

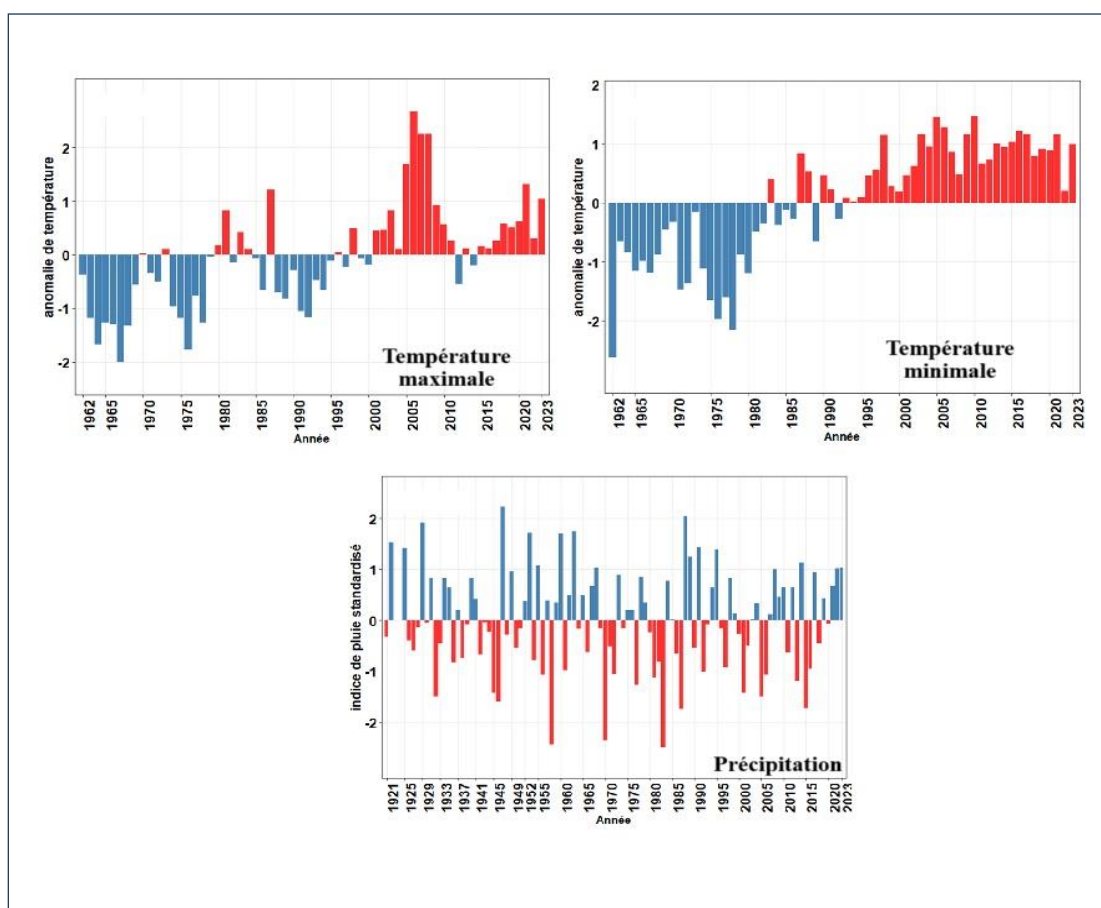


Figure 7 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Parakou

Deux grandes périodes peuvent être observées pour les températures maximales et minimales à la station de Kandi (Figure 8). Avant 1980, la majorité des années sont froides, avec des températures maximales et minimales en dessous de la moyenne, traduisant des anomalies négatives. À partir des années 1980, on constate une augmentation progressive des températures

avec une prédominance d'années chaudes, les anomalies étant majoritairement positives jusqu'à 2023.

Pour les précipitations à cette station, les années 1921 à 1965 sont majoritairement humides, marquées par des indices de précipitations excédentaires. Cependant, une inversion se produit à partir des années 1970, avec une alternance entre années excédentaires et déficitaires, mais les années sèches et déficitaires semblent être plus fréquentes dans la période récente, indiquant une tendance à la baisse des précipitations pour les dernières années. (Figure 8)

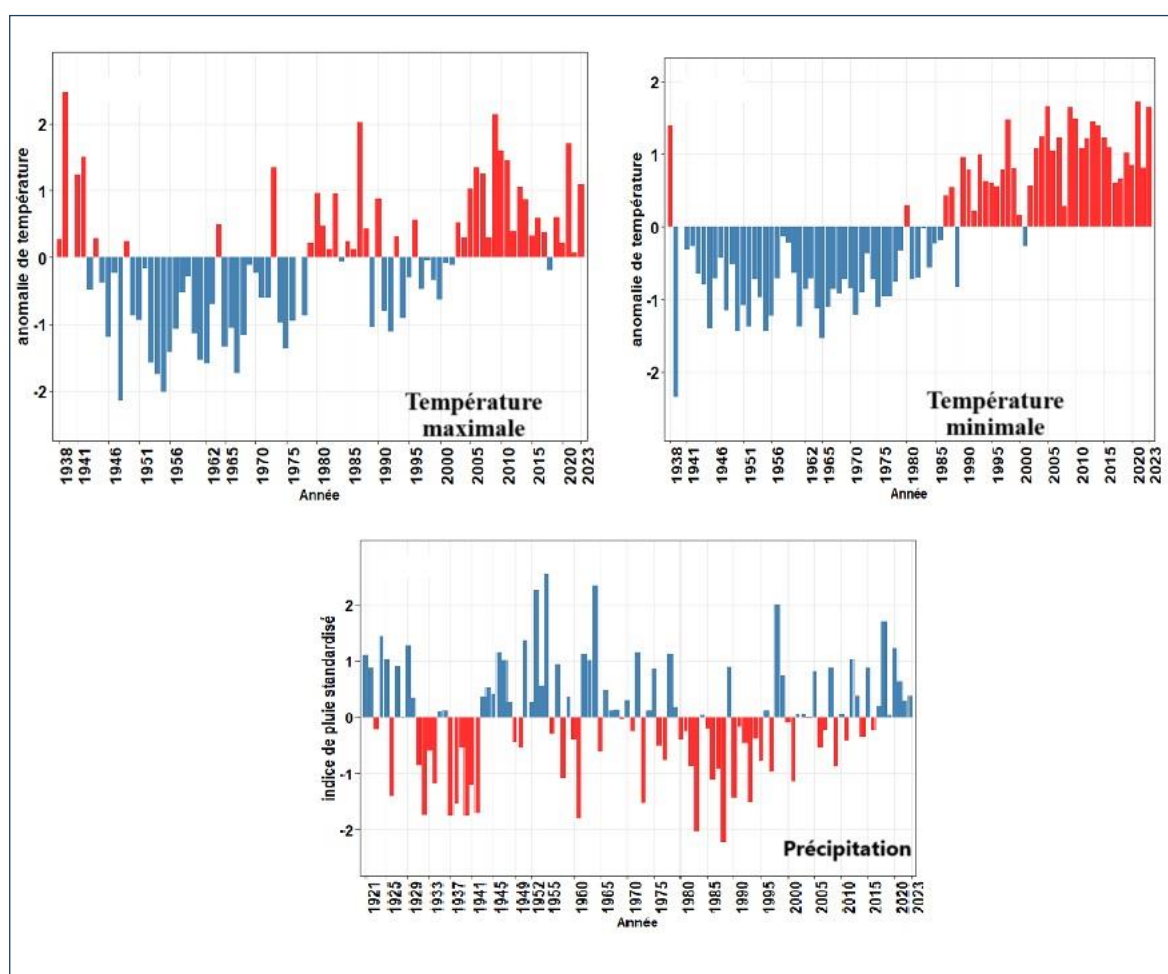


Figure 8 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Kandi

À Natitingou (Figure 9), les températures maximales et minimales montrent également deux grandes périodes. Avant les années 1970, les années sont froides, avec des anomalies majoritairement négatives. Toutefois, à partir de 1980, une nette tendance vers des années chaudes avec des anomalies positives beaucoup plus normales au niveau de la station.

En ce qui concerne les précipitations (Figure 9), les années 1920 à 1960 sont en majorité humides, avec de nombreux indices de précipitation excédentaires. À partir de 1970, on remarque une alternance plus marquée entre années excédentaires et déficitaires, bien que les années sèches dominent progressivement dans la période récente. Au début des observations, les anomalies ont dépassé -1 voire 1 (avant 1926). C'est bien après cette année que la situation paraît normale dans cette station.

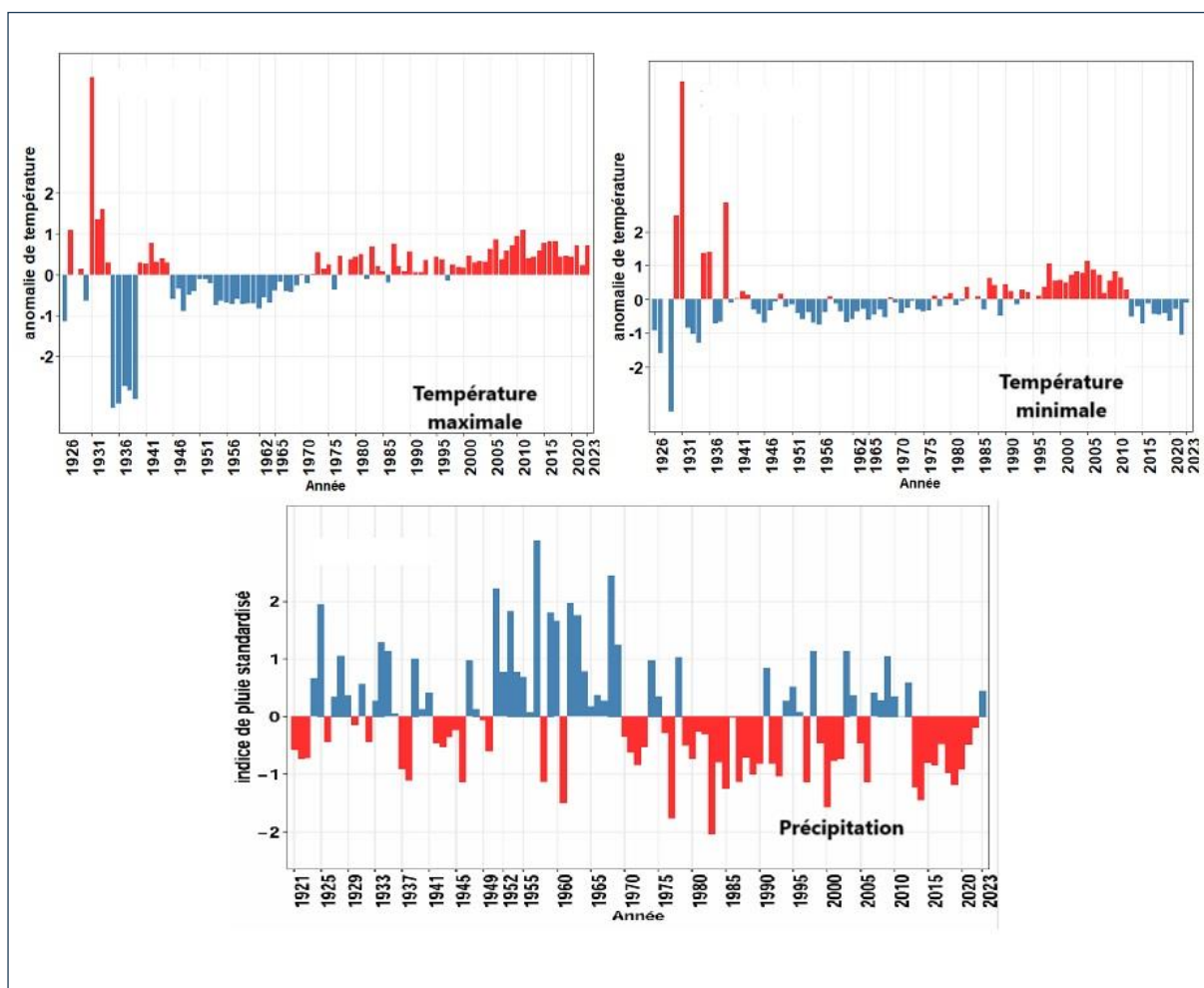


Figure 9 : Variabilité interannuelle de pluie et température à la station synoptique de Natitingou

2.1.2 Tendence centennale des températures et précipitations

Le test de Mann Kendall appliqué aux données de précipitations, aux températures maximales et minimales révèle les résultats suivants (tableau 4).

Tableau 4 : Résultat du test de Mann-Kendall pour les séries annuelles de pluie et de température sur la période de 1921-2023

Stations	Paramètres	Mann-Kendall	
		Tau	P-value
Cotonou	Précipitation	-1	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température maximale	0.5	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.07	$< 2,2. 10^{-16}$
Bohicon	Précipitation	0,007	0.29
	Température maximale	0.5	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.5	0,001
Savè	Précipitation	-0,17	0.001
	Température maximale	0.5	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.5	$< 2,2. 10^{-16}$
Parakou	Précipitation	0.5	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température maximale	0.48	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.06	$< 2,2. 10^{-16}$
Kandi	Précipitation	0,01	0.87
	Température maximale	0,33	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.57	$< 2,2. 10^{-16}$
Natitingou	Précipitation	0.23	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température maximale	0.41	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	0.23	$< 2,2. 10^{-16}$

L'évolution des paramètres de précipitations, de températures maximales et minimales sur la période d'étude révèle qu'à la station de Cotonou, les précipitations et températures minimales montrent l'existence d'une tendance non significative avec un $Tau < 0,2$ (tableau 3) même si la $p\text{-value} < 0,05$. En revanche, les températures maximales présentent un Tau égal à 0,5 et un $p\text{-value} < 0,05$ indiquant l'existence d'une tendance modérément significative.

Les stations de Bohicon et de Savè, montrent l'absence d'une tendance au test de Mann Kendall pour les précipitations car elles révèlent un $Tau < 0,2$ et un $p\text{-value} > 0,05$ tandis que les températures maximales et minimales à ces stations donnent un Tau égal à 0,5 et un $p\text{-value} <$

0,05 ce qui montre l'existence d'une tendance modérément significative conformément aux critères de significativités (Tableau 3).

Sur la station de Parakou, les précipitations et les températures maximales donnent un tau entre 0,4 et 0,7 avec un p-value $< 0,05$ ce qui indique la présence d'une tendance modérément significative. Par contre, les températures minimales révèlent une présence de tendance non significative avec un Tau $< 0,2$ et un p-value $< 0,05$.

La station de Kandi révèle l'absence d'une tendance significative au test de Mann Kendall pour les précipitations (Tau $< 0,2$ et p-value $> 0,05$). Les températures sur cette station montrent une présence de tendance significative (p-value $> 0,05$), une tendance faiblement significative pour les températures maximales et une tendance modérément significative pour les températures minimales conformément aux critères de significativité.

Enfin sur la station de Natitingou, les paramètres de précipitations, de températures maximales et minimales ont révélé tous une présence de tendance significative (p-value $> 0,05$) mais différemment significative. Elle est faiblement significative pour les précipitations et températures minimales tandis qu'elle est modérément significative pour les températures maximales.

2.1.3 Changements observés

2.1.3.1 Ruptures obtenues dans les séries de paramètres climatique

Le test de Pettit appliqué aux données de précipitations, aux températures maximales et minimales relève le résultat récapitulé dans le tableau 5 ci-dessous

Tableau 5 : Résultat du test de Pettitt pour les séries annuelles de pluie et de température sur la période de 1921-2023

Stations	Paramètres	Pettitt	
		Année de rupture	de P-value
Cotonou	Précipitation	1969	0,94
	Température maximale	1992	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1986	$< 2,2. 10^{-16}$
Bohicon	Précipitation	2012	0,37
	Température maximale	1976	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1994	$< 2,2. 10^{-16}$
Savè	Précipitation	1937	0,01
	Température maximale	1995	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1980	$< 2,2. 10^{-16}$
Parakou	Précipitation	1968	1,00
	Température maximale	1992	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1994	$< 2,2. 10^{-16}$
Kandi	Précipitation	2011	0,74
	Température maximale	1977	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1983	$< 2,2. 10^{-16}$
Natitingou	Précipitation	1969	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température maximale	1971	$< 2,2. 10^{-16}$
	Température minimale	1975	$< 2,2. 10^{-16}$

Les résultats montrent une rupture significative des précipitations aux stations de Savè et Natitingou ($p < 0,05$), tandis que les autres stations malgré la détection des années de rupture sur chacune d'elles, ces ruptures ne sont pas statistiquement significatives ($p > 0,05$). En ce qui concerne les températures, la rupture a été significative à toutes les stations.

2.1.3.2 Ecarts des moyennes avant et après rupture

Le tableau 6 montre les résultats de l'écart entre les moyennes de températures avant et après une rupture et de l'écart relatif entre la moyenne des précipitations avant et après rupture aux six stations étudiées.

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats de l'écart entre moyenne des températures avant et après rupture et de l'écart relatif entre la moyenne des précipitations avant et après rupture.

Stations	Paramètres	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Ecart
Cotonou	Précipitation	1404,57	1270,79	-9,53%
	Température maximale	30,07	30,8	0,73°C
	Température minimale	24,22	25,16	0,94°C
Bohicon	Précipitation	1117,21	1025,56	-8,20%
	Température maximale	32,01	32,74	0,73°C
	Température minimale	22,64	23,56	0,92°C
Savè	Précipitation	1961,18	1093,53	-44,24%
	Température maximale	33,77	33,82	1,05°C
	Température minimale	21,8	22,65	0,85°C
Parakou	Précipitation	1201,46	1154,26	-3,93%
	Température maximale	32,55	33,33	0,78°C
	Température minimale	20,96	21,96	1°C
Kandi	Précipitation	1024,32	1124,12	9,74%
	Température maximale	34,16	34,69	0,52°C
	Température minimale	20,85	21,96	1,11°C
Natitingou	Précipitation	1275,44	1126,25	-11,70%
	Température maximale	32,52	33,67	1,15°C

Température minimale	20 ,75	21,02	0,27°C
-------------------------	--------	-------	--------

L'observation des températures aux six stations montre qu'il y a une augmentation notable des températures maximales après la rupture, comme le montre les différences positives statistiquement significative c'est-à-dire qu'elles ne sont pas dues au hasard. De la même manière, les températures minimales présentent également une augmentation significative après la rupture, à l'exception de la station de Natitingou. Une différence faiblement significative, indiquant que l'augmentation enregistrée dans cette station pourrait être due au hasard.

En ce qui concerne les précipitations la plupart des stations montrent une diminution des précipitations après la rupture, avec Savè affichant une réduction très marquée. Cependant, Kandi est la seule station à montrer une légère augmentation des précipitations.

2.1.3.3 Records climatiques depuis le début des observations météorologiques

Le tableau 7 ci-dessous présente un ensemble de records climatiques journaliers et mensuels enregistrés pour les différentes stations synoptiques au Bénin. Ce tableau met en évidence les valeurs extrêmes de précipitations, de températures maximales et de températures minimales enregistrées depuis la création de ces stations.

Tableau 7 : Tableaux récapitulatifs des records climatiques atteints aux six stations synoptiques depuis le début des observations.

Journaliers						
Station	Précipitation (mm)	Date	Température Maximale (°C)	Date	Température minimale (°C)	Date
Cotonou	194,2	14/04/2003	39	08/10/1999	16,7	16/12/2015
Bohicon	130,7	23/09/2014	40,6	12/03/1973	14,8	22/01/1976
Savè	256,7	14/08/2022	42	1/02/1939	12	29/05/1940
Parakou	176	25/08/1988	41,6	31/03/2007	12	29/11/2022
Kandi	157,8	20/08/1964	48,7	20/04/1947	8,5	12/01/1957
Natitingou	158,6	30/09/2020	48,3	07/04/2015	8,8	17/12/2015

Mensuels						
Station	Précipitation (mm)	Date	Température Maximale (°C)	Date	Température minimale (°C)	Date
Cotonou	836	Juin-62	33,6	Févr-98	20,7	Janv-83
Bohicon	520	Juil-99	38,1	Mars-98	20,2	Août-61
Savè	673,6	Juil-33	39,7	Mars-17	17,4	Mai-40
Parakou	448	Sept-34	39,7	Mars-07	16	Janv-81
Kandi	548	Août-64	42,2	Avr-52	13,2	Déc-51
Natitingou	497	Sept-52	41,1	Avr-31	13,7	Déc-15

Records journaliers :

Pour les records journaliers, on observe que la station de **Kandi** détient la température maximale la plus élevée avec **48,7°C**, mesurée le **20 avril 1947**. Concernant la température minimale la plus basse, elle a été observée également dans la station de **Kandi**, avec **8,5°C** enregistrée le **12 janvier 1957**, mettant en évidence des nuits très fraîches dans cette région en saison sèche.

En ce qui concerne les précipitations, la valeur journalière la plus importante est enregistrée à **Savè** avec **256,7 mm** le **14 Aout 2022**.

Records mensuels :

Sur le plan mensuel, la station de **Cotonou** détient le record des précipitations les plus abondantes avec **836 mm** enregistrés en **juin 1962**.

Du côté des températures maximales et minimales, **Kandi** conserve le record mensuel le plus élevé avec **42,2°C** en **avril 1952** et le plus bas avec **13,2°C** en **décembre 1951**.

2.1.3.4 Analyses des isohyètes

L'évolution des isohyètes pour trois normales climatologiques (1971-2000 ; 1981-2019 ; 1991-2020) au Bénin, présente des similarités (figure 13). Pour les trois normales, les isohyètes varient du sud au nord de 1100 à 900 mm. Il faut remarquer que le sud et le centre enregistrent les isohyètes de 1000 mm et plus tandis qu'au nord les isohyètes ne dépassent pas 1000 mm ceci rime avec les caractéristiques climatiques du pays. En effet, le climat au sud, est du type subéquatorial, centre de transition entre le sud et le nord puis le nord de type soudanien.

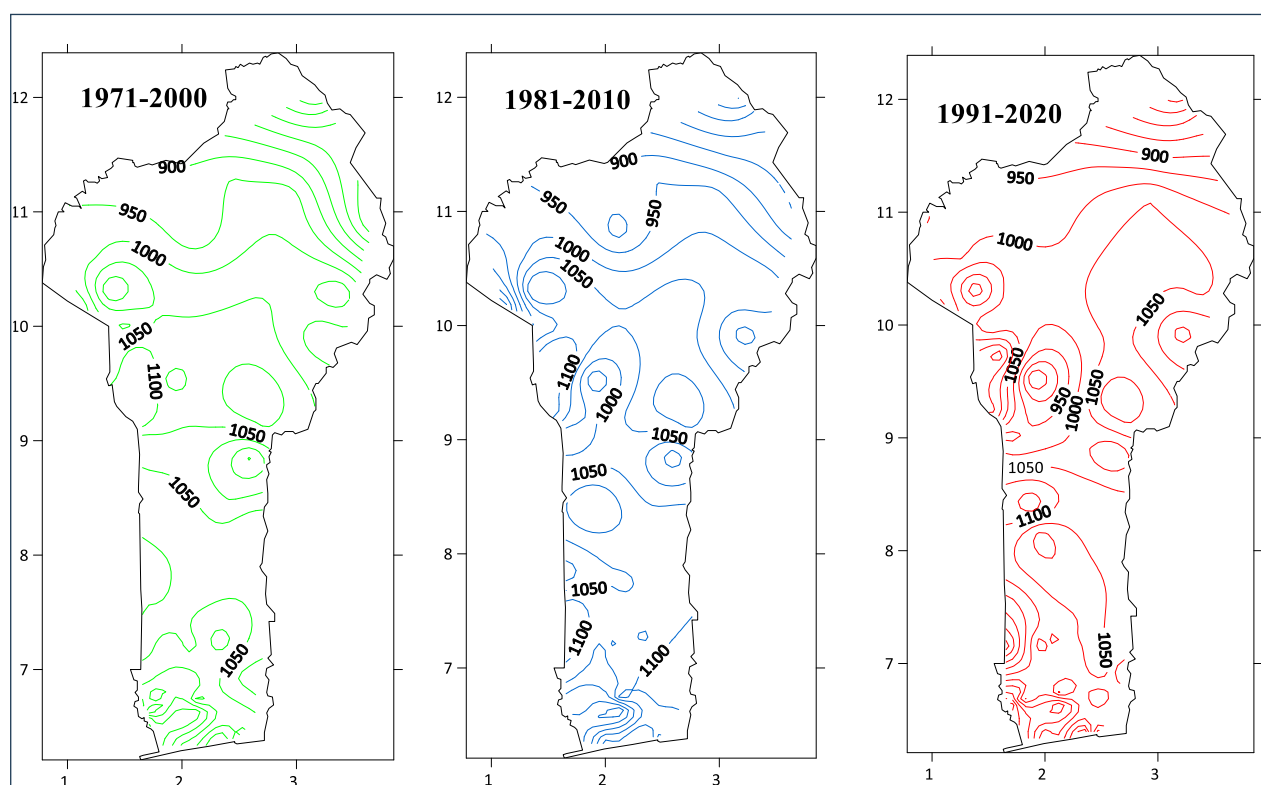


Figure 10 : Evolution des isohyètes pour trois normales climatologiques

2.2 DISCUSSIONS

Les résultats de cette étude sur la variation centennale du climat au Bénin révèlent plusieurs tendances majeures. En premier lieu, on observe une augmentation significative des températures maximales et minimales dans presque toutes les stations synoptiques étudiées, notamment à partir des années 1980. Cette tendance s'inscrit dans un contexte de réchauffement climatique global, avec une hausse des températures atmosphériques observée à l'échelle mondiale. Ces variations peuvent être attribuées aux effets du changement climatique global, comme le souligne les rapports du GIEC (GIEC, 2014). En ce qui concerne les précipitations, les résultats montrent une variabilité importante, avec une tendance générale à la baisse dans certaines stations. Les stations du Centre et Nord du Bénin, telles que Savè et Natitingou, révèlent une diminution notable des précipitations, confirmant ainsi un assèchement progressif de ces zones comme le souligne Oyede et al. dans leur étude sur les caractéristiques Spatio – temporelles de la variabilité Climatique au Benin en 2022. Cette réduction des pluies peut avoir des impacts significatifs sur l'agriculture et les ressources en eau, particulièrement dans les zones rurales où les communautés dépendent fortement des précipitations pour l'irrigation et les cultures vivrières. L'analyse des records climatiques atteints depuis le début des observations met en évidence les périodes des valeurs extrêmes qui n'ont jamais été dépassées. En effet, à Kandi, a été enregistré depuis le début des observations la température maximale journalière la plus élevée ,48,7°C le 20 Avril 1947. Cela confirme la répartition du gradient de température dans le pays. Ces résultats sont en accord avec les observations faites dans d'autres régions tropicales. Par exemple, Sylla et al. (2015) ont constaté une augmentation significative des températures en Afrique de l'Ouest, une tendance qui concorde avec les hausses observées dans nos stations synoptiques. De plus, les études d'Amoussou et al. (2016) montrent également une réduction des précipitations au Bénin au cours des dernières décennies, ce qui renforce les résultats obtenus, en particulier dans les stations du sud. L'analyse des tendances révèle cependant une certaine hétérogénéité spatiale dans la distribution des précipitations. Pendant que les stations de Bohicon et Parakou montrent une certaine stabilité des précipitations, d'autres, comme Savè, enregistrent des baisses très prononcées. Cette variabilité climatique, pourrait être due à des facteurs tels que la topographie locale et les courants atmosphériques comme la Mousson Ouest-Africaine (MOA). En outre, l'application du test de Pettitt a permis d'identifier des ruptures significatives dans les séries de données, principalement pour les températures, avec des points de rupture notables dans les années 1980 et 1990 ce qui confirme

les résultats de (Bessou, 2018) dans son étude sur la caractérisation de la variabilité et détection des effets de changement climatique au Sud du Bénin. Ces ruptures correspondent à des périodes de réchauffement rapide, confirmant une tendance climatique perturbée, avec des impacts possibles sur les cycles hydrologiques et agricoles.

Bien que nos résultats corroborent en grande partie les observations de Dossou et al. (2021) sur les tendances des températures et des précipitations, notre étude, qui s'étend sur une période centennale, offre une perspective plus longue sur les fluctuations climatiques au Bénin.

En fin, les résultats de cette étude offrent une plus large compréhension pour situer les périodes de début des observations dans les stations synoptiques, les périodes pendant lesquelles les variabilités des paramètres climatiques sont accentuées et les moments des records jamais dépassés. Ces informations, contenues dans ce document pourront servir de repère pour la prise de décision sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique.

CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS

L'objectif de cette étude est d'étudier la variation centennale du climat au Bénin. Il s'inscrit dans le cadre d'une meilleure appréhension de la variabilité climatique au Bénin depuis le début des observations météorologiques. Les résultats ont permis de mettre en évidence des tendances significatives, ont permis de déterminer des périodes humides et sèches, froides et chaudes, les stations ayant des précipitations régulières ou irrégulières et des valeurs extrêmes telles que des records jamais dépassés depuis le début des observations météorologiques. En effet, les températures maximales et minimales sont en augmentation dans toutes les stations synoptiques et les précipitations à la baisse. Les précipitations ont été très variables avec une alternance d'années sèches et humides. Les années 1990, ont été repérées comme années de début d'augmentation des températures (anomalies positives). Par ailleurs, la température maximale la plus élevée depuis le début des observations météorologiques jusqu'à ce jour a été enregistrée à Kandi le 20 Avril 1947 et la minimale la plus basse, 8,5°C a été enregistré le 12 janvier 1957 toujours à Kandi. Parallèlement, les précipitations, notamment dans les stations du sud, tendent à diminuer.

Ces résultats soulignent l'urgence d'adapter les politiques de gestion des ressources en eau. Les fluctuations importantes des précipitations et des températures observées au cours de ces dernières années nécessitent une gestion plus rigoureuse des ressources naturelles, notamment en matière d'agriculture et de gestion des bassins hydrographiques.

Il serait pertinent, dans les études futures, d'approfondir l'analyse des impacts socio-économiques de ces variations climatiques et d'explorer des solutions d'adaptation locales, notamment dans les secteurs agricoles et énergétiques.

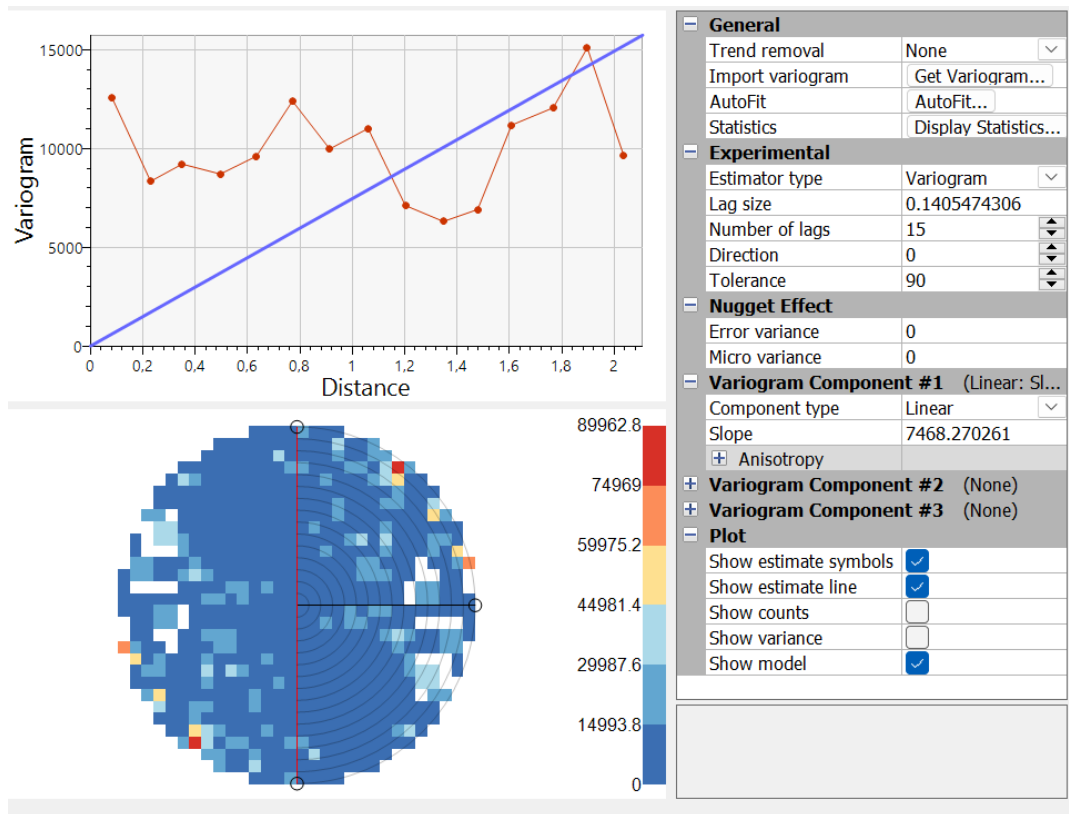
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Alijani B, O'Brien J, Yarnal B. (2008). *Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. J Theor Appl Climatol* 94.
2. Amoussou, E. (2010). *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*.
3. Amoussou E., Totin Vodounon S. H., Cledjo F. P., Allagbe Y. B., Akognongbe J. S. A., Houndenou C., Mahe G., Camberlin P., Boko M., & Perard J. (2016). *Evolution climatique du Bénin de 1950 à 2010 et son influence sur les eaux de surface*.
4. Apaydin H., Erpul G., Bayramin I., Gabriels D. (2006). *Evaluation of indices for characterizing the distribution and of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. Journal of Hydrology*, 328.
5. Bessou, J. (2018). *Caractérisation de la variabilité et détection des effets de changement climatique au Sud du Bénin*.
6. Chabi Ayédèguè Biaou Philippe, Afouda Fulgence, Ogouwale Euloge & Yabi Ibouraima. (2014). *Analyse spatio-temporelle des pluies du mois de Janvier au Bénin*. 54-61.
7. D. O. Gameda, Akalu Dafisa Sima. (2015, octobre 31). *The impacts of climate change on African continent and the way forward*.
8. Dossou, J., Li, X., Kang, H., & Boré, A. (2021). *Impact of climate change on the Oueme basin in Benin. Global Ecology and Conservation*, 28, e01692. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01692>
9. Giec. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*.
10. Giec. (2014). *Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse*.
11. Gnangle, C., Glele Kakai, R. L., Assogbadjo, A., Vodounnon, S., Yabi, J., & Sokpon, N. (2011). *Tendances climatiques passées, modélisation, perceptions et adaptations locales au Bénin. Climatologie*, 8, 26-40. <https://doi.org/10.4267/climatologie.259>
12. Idrissou, Y., Seidou, A. A., Tossou, F. M., Worogo, H. S. S., Baco, M. N., Adjassin, J. S., Assogba, B. G. C., & Traore, I. A. (2020). *Perception du changement climatique par les éleveurs de bovins des zones tropicales sèche et subhumide du Bénin : Comparaison avec les données météorologiques. Cahiers Agricultures*, 29, 1. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019032>
13. Afouda J. yabi, Kassim Issaka, & Lionnel Ayedegue. (2020, février). *Typologie Et Déterminants Des Stratégies D'adaptation Aux Changements Climatiques En Riziculture Au Nord Et Centre Du Bénin*.
14. Lawin, Houngue, Biaou, Badou. (2019). *Statistical Analysis of Recent and Future Rainfall and Temperature Variability in the Mono River Watershed (Benin, Togo)*.
15. Olivier, J. (1980). *Monthly Precipitation Distribution: A Comparative Index. Professional Geographer* 32.

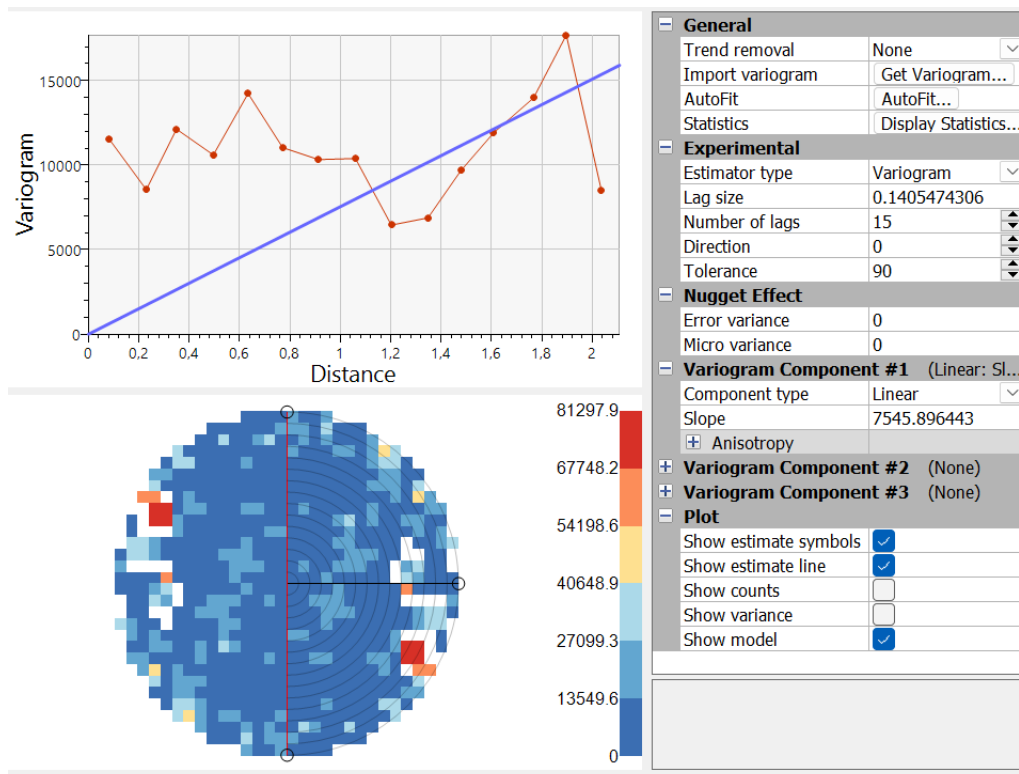
16. Oyede, M. I., Hounzime, S., Agbokou, I., Alhassane, A., & Yabi, I. (2022). *Caracteristiques Spatio – temporales de la Variabilite Climatique au Benin (Afrique de L'ouest)*. *European Scientific Journal, ESJ*, 18(30), 240. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n30p240>
17. Patrick Grennier, O. (2020, décembre). *Atlas climatique du Bénin*.
18. RGPH, I. (2015, juin). *RGPH 2013*. <https://instad.bj/images/docs/insae-statistiques/demographiques/population/Resultats%20definitifs%20RGPH4.pdf>
19. Siddhesh Sunil Zade, Veldandi Apoorva, Amitava Panja, Sanchita Garai, & Sanjit Maiti. (2023, Aout). *Usability of Man-Kendall's Test and Sen's slope in Assessing the Trend in the Climatic Parameters*.
20. Sylla, M. B., Giorgi, F., Pal, J. S., Gibba, P., Kebe, I., & Nikiema, M. (2015). *Projected Changes in the Annual Cycle of High-Intensity Precipitation Events over West Africa for the Late Twenty-First Century**. *Journal of Climate*, 28(16), 6475-6488. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00854.1>

ANNEXES

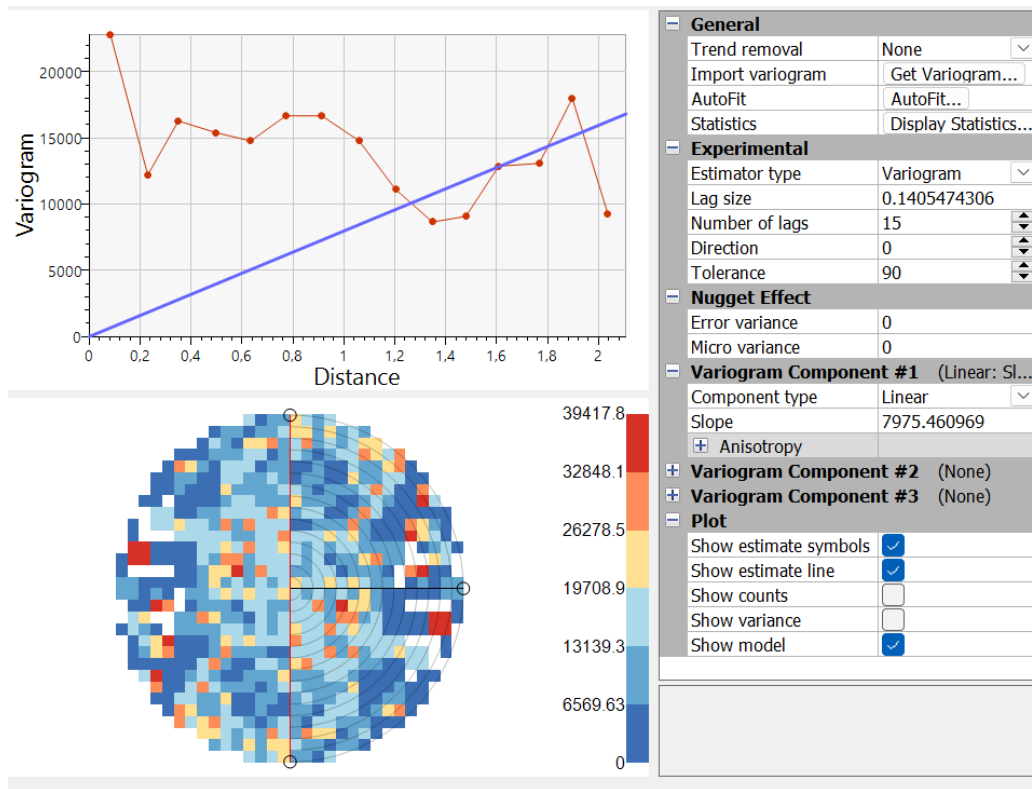
Annexe 1 : Ajustement du variogramme de la normale 1971-2000



Annexe 2 : Ajustement du variogramme de la normale 1981-2010



Annexe 3 : Ajustement du variogramme de la normale 1991-2020



Annexe 4 : Tableau des stations pluviométriques utilisées pour les données des trois normales climatiques

STATIONS	LONGITUDE	LATITUDE
ABOMEY	1,98	7,18
ADJOHOUN	2,48	6,7
AGOUNA	1,7	7,55
ALFAKOARA	3,07	11,44
ALLADA	2,13	6,65
APLAHOUE	1,66	6,91
ATHIEME	1,67	6,59
BANIKOARA	2,43	11,3
BANTE	1,88	8,41
BASSILA	1,66	9,02
BEMBEREKE	2,66	10,2
BETEROU	2,25	9,2
BIRNI	1,52	9,99
BOHICON	2,05	7,2
BONOU	2,5	6,93
BOPA	1,96	6,56
BOUKOUMBE	1,1	10,16
COTONOU_AEROPORT	2,38	6,35
COTONOU-PORT	2,43	6,35
COTONOU-VILLE	2,43	6,35
DASSA-ZOUME	2,16	7,75
DJOUGOU	1,6	9,74
DOGBO	1,78	6,75
GOUKA	1,96	8,13
GRAND-POPO	1,81	6,28
HOUIN-AGAME	1,8	6,71
KALALE	3,38	10,29
KANDI_AEROPORT	2,93	11,13
KARIMAMA	3,18	12,05
KEROU	2,11	10,82

KOKORO	2,64	8,25
KOUANDE	1,69	10,33
LOKOSSA	1,71	6,63
LONKLY	1,65	7,15
MALANVILLE	3,36	11,86
NATITINGOU	1,38	10,31
NIAOULI	2,14	6,73
NIKKI	3,2	9,93
OKPARA	2,73	9,1
OUANDO	2,61	6,5
OUESSE	2,42	8,49
OUIDAH	2,1	6,36
OUIDAH-NORD	2	6,36
PARAKOU_AEROPORT	2,61	9,35
PARTAGO	1,9	9,53
PENESSOULOU	1,55	9,23
POBE	2,66	6,93
PORTO-NOVO	2,61	6,48
SAKETE	2,66	6,71
SAVE	2,48	8,01
SEGBANA	3,69	10,92
SEKOU	2,23	6,61
SEMERE	1,36	9,55
TANGUIETA	1,26	10,61
TCHAUROU	2,6	8,86
TCHETTI	1,66	7,82
TOFFO	2,1	6,84
ZAGNANADO	2,33	7,25

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Listes des sigles et acronymes	v
Listes des figures	vi
Listes des tableaux	vii
Sommaire	ix
Introduction Générale	1
1. Contexte, justification du sujet et problématique	1
2. Revue de littérature	2
2.1 . Clarification conceptuelle	2
2.2 . Etat de connaissance	3
2.2.1 Méthode d'analyse de variation des paramètres	5
2.2.2 Méthode de détermination des tendances	5
2.2.3 Méthode de détermination des points de ruptures	6
3. Objectifs de l'étude	6
4. Hypothèses	7
Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes	9
1.1 MILIEU D'ETUDE	9
1.1.1 Localisation géographique du Bénin et des stations synoptiques	9
1.1.2 Climat	11
1.2 METHODOLOGIE	12
1.2.1 Données	12
1.2.2 Outils	12
1.2.3 Méthode de traitements et d'analyse des données	13
1.2.3.1 Variation centennale des paramètres climatiques	13
1.2.3.2 Tendance centennale des températures et des précipitations	14
1.2.3.3 Détermination des changements observés	15
Chapitre 2 : Résultats et discussion	17
2.1 RESULTATS	17
2.1.1 Variation centennale des paramètres climatiques	17
2.1.1.1 Indice de concentration des précipitations (ICP)	17

2.1.1.2	Indice des précipitations standardisées (ISP)	18
2.1.2	Tendance centennale des températures et précipitations	23
2.1.3	Changements observés	25
2.1.3.1	Ruptures obtenues dans les séries de paramètres climatique	25
2.1.3.2	Ecarts des moyennes avant et après rupture	27
2.1.3.3	Records climatiques depuis le début des observations météorologiques	28
2.1.3.4	Analyses des isohyètes	30
2.2	DISCUSSIONS	31
CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS		33
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		34
ANNEXES		36