

DIAGNOSTIC STATISTIQUE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES EXTREMES CLIMATIQUES AU BENIN

Mémoire de Master de Recherche en Statistique

Option : Statistique Appliquée Aux Vivants (SAV)



Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications

(CIPMA - Chaire UNESCO)

FAST/UAC

par

Gino Roland KIKI

superviseur

Professeur Soumaïla Moumouni

Année Académique :2019-2020

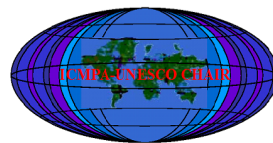


Université d' Abomey-Calavi (UAC)

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications

(CIPMA - Chaire UNESCO)



Statistique Appliquée aux Vivants (SAV)

**DIAGNOSTIC STATISTIQUE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE
DES EXTREMES CLIMATIQUES AU BENIN**

présenté par :

Gino Roland Kiki

superviseur :

Professeur Sounmaïla Moumouni

Année Académique : 2019-2020

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère KIKI Nascimento Irmine S.E.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au professeur Norbert Hounkonnou, président de la CIPMA, chaire UNESCO, et au Professeur Ezinvi Baloïtcha, secrétaire scientifique de ladite institution, pour les investissements de toute nature qui sont injectés dans notre formation.

Nos remerciements vont également à l'endroit du professeur Emmanuel Lawin, pour avoir initié nos travaux de stage académique en 2019 en étroite collaboration avec le professeur Sounmaïla Moumouni, qui a accepté d'encadrer ce travail de recherche pour le compte du projet Laboratoire Mixte International REZOC (LMI-REZOC) coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Nous remercions tous les dirigeants de l'IRD ainsi que leurs collaborateurs, particulièrement, mesdames Sylvie Galle et Rolande Lawin, respectivement co-responsable du projet LMI-REZOC et secrétaire dudit projet.

Nous tenons aussi à exprimer toute notre reconnaissance et nos sincères remerciements à tous les autres membres de la communauté scientifique de notre école, la CIPMA, dont notamment,

- nos professeurs Georges Agbahungba, Villevo Adanhounmè et Nicodème Atchadé pour leurs conseils avisés depuis notre entrée en master, et l'entame de nos travaux de recherche à la CIPMA et plus tard à l'IRD
- nos collègues étudiants, en particulier messieurs Yves Morel Sokadjo, Mouhamed Salifou et Diam Médékon .

Qu'il nous soit permis d'aller bien au delà du monde scientifique et universitaire pour remercier nos frères et sœurs et tous les autres membres de notre famille pour leur soutien, sans oublier nos amis et proches.

Enfin, pour sa bienveillante attention et ses précieux conseils, que ce soit sur les plans éducatif et affectif ou sur les plans technique et scientifique, nous ne saurions terminer ces remerciements sans exprimer notre profonde gratitude à notre père, Vincent Jean-Marie Kiki, enseignant chercheur en Statistique mathématique à l'UAC.

Liste des sigles et abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales
CAH : Classification Ascendante Hiérarchique
CDD : Consecutive Dry Days (jours secs consécutifs)
CSDI : Cold Spell Duration Indicator (indicateur de durée des séquences fraîches)
CWD : Consecutive Wet Days (jours pluvieux consécutifs)
DTR : Diurnal Temperature Range (amplitude thermique diurne)
ETCCDI : Expert Team on Climate Change Detection Indices (équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices)
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
ICP : Indice de Concentration de Précipitation
IP (IPL) : Indice Pluviométrique (de Lamb)
M-K : Mann-Kendall
NSIDC : National Snow and Ice Data Center (centre national de données sur la neige et la glace)
OHHVO : Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé
PRCPTOT : total pluviométrique annuel
RclimDex : Programme d'indices climatiques
RX1day (RX1) : hauteur maximale des précipitations d'un jour
RX5day (RX5) : cumul maximum de précipitations de cinq jours
R10mm (R10) : nombre de jours de précipitations d'au moins 10 mm
R20mm (R20) : nombre de jours de précipitations d'au moins 20 mm
R25mm (R25) : nombre de jours de précipitations d'au moins 25 mm
R95p (R95) : jours très pluvieux
R99p (R99) : jours extrêmement pluvieux
SDII : Simple Daily Intensity Index (intensité simple des pluies)
SU25 (SU) : Summer Days (jours d'été avec une température d'au moins 25 °C)
Tmax : Température maximale
Tmin : Température minimale
TNn : minimum des températures minimales
TNx : maximum des températures minimales
TN10p (TN10) : nuits relativement fraîches
TN90p (TN90) : nuits relativement chaudes

TR20 : Tropical Nights (Nuits tropicales avec une température d'au moins 20 °C)

TXn : minimum des températures maximales

TXx : maximum des températures maximales

TX10p (TX10) : jours relativement frais

TX90p (TX90) : jours relativement chauds

WSDI : Warm spell duration indicator (indicateur des durées des séquences chaudes)

Table des figures

2.1	Carte de la région d'étude (le Bénin) et les stations pluviométriques	25
3.1	Séries chronologiques de l'ICPM des huit stations représentatives des zones climatiques	40
3.2	Classification des stations selon l'ICPM	41
3.3	Indice de l'anomalie des cumuls de précipitations interannuelle des stations représentatives des huit zones climatiques	45
3.4	Cycles saisonniers moyens des années normales	48
3.5	Cycles saisonniers moyens des années excédentaires	49
3.6	Cycles saisonniers moyens des années déficitaires	50
3.7	Sortie RCLimDex, indice de cumul de précipitation annuelle (PRCPTOT), des stations représentant les huit zones climatiques	53
3.8	Chronogrammes des moyennes annuelles de températures des six stations synoptiques	60
3.9	Chronogrammes des moyennes mensuelles de températures des six stations	61
3.10	Sortie RCLimDex, indice du nombre annuel de jours d'été (SU25), des 06 stations synoptiques	63

Liste des tableaux

2.1	Stations pluviométriques et les coordonnées géographiques	26
2.2	Niveaux de distribution des précipitations de l'ICPM	29
2.3	Onze indices des extrêmes de précipitations	31
2.4	Onze indices des extrêmes de température	33
3.1	Répartition des stations pluviométriques en zones climatiques	42
3.2	Pourcentage des différents types d'années de pluviométrie	46
3.3	Niveaux de significativité des coefficients de Mann-Kendall	51
3.4	Pourcentage significativité et de signe des tendances des indices des extrêmes de précipitations pour les stations 42 sur la période 1955-2016	52
3.5	: La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1955 à 2016.	54
3.6	Analyse des résultats du RclimDex des onze indices d'extrêmes de précipitations des huit zones climatiques au Bénin, de 1955 à 2016	55
3.7	La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1955 à 1985	58
3.8	La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1986 à 2016	58
3.9	Synthèse du test de tendance de Mann-Kendall relatif aux moyennes annuelles des températures maximale et minimale	62
3.10	Pourcentage significativité et de signe des tendances des indices des extrêmes de températures pour les 06 stations synoptiques sur la période 1955-2016	64
3.11	La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des treize indices des extrêmes de températures des six stations synoptiques, de 1986 à 2016	65
5.1	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 1	69
5.2	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 2	69
5.3	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 3	69
5.4	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 4	70
5.5	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 5	70
5.6	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 6	70
5.7	Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 7	70

5.8 Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 8 70

Abstract

This study analyzes the spatio-temporal variability of rainfall and temperature extremes in Benin. The method used is based on the calculation and trend analysis of climate extremes indices established under the (computer) program RclimDex, developed by the Expert Team on Climate Change Detection Detection Indices -ETCCDI-. The trend analysis is carried out using a non-parametric method, that of Mann-Kendall (1945) and has made it possible to quantify the annual variations of these indices. The data used cover the period from 1955 to 2016 and relate to the daily rainfall of 45 stations distributed in the twelve departments of the country and the daily temperatures of 06 synoptic stations distributed from north to south.

Previously, an approach for the detection of climatic zones was implemented using as variables for the distribution of zones, the index of concentration of monthly rainfall (ICMR). Eight climatic zones were detected by descriptive analysis of the data.

Eight representative stations were selected per zone and were the subject of the RclimDex analysis, which consisted of econometric modelling of the time series of 24 climate extremes indices. The results obtained reveal a generalized trend of high temperatures and an overall decrease in rainfall over the entire region.

In Natitingou, the minimum night-time temperatures decrease significantly and justify the extreme cold conditions during the nights while Kandi warms considerably, with the warm sequences lengthening. It should be noted that this central region of Benin undergoes an intense and accelerated warming both at night and during the day.

Keywords : trends in indices of extreme rainfall and temperature, RclimDex, climate change, ICMR, and climate zones.

Résumé

Cette étude analyse la variabilité spatio-temporelle des extrêmes de précipitations et de températures au Bénin. La méthode utilisée est basée sur le calcul et l'analyse des tendances des indices d'extrêmes climatiques établis sous le programme (informatique) RclimDex, mis au point par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (Expert Team on Climate Change Detection Indices -ETCCDI-). L'analyse de tendance est effectuée suivant une méthode non-paramétrique, celle de Mann-Kendall (1945) et a permis de quantifier annuellement les variations de ces indices. Les données utilisées couvrent la période de 1955 à 2016 et sont relatives à la pluviométrie quotidienne de 45 stations réparties dans les douze départements du pays et aux températures quotidiennes de 06 stations synoptiques réparties du nord au sud.

Préalablement, une approche de détection des zones climatiques a été mise en œuvre en utilisant comme variables de répartition de zones, l'indice de concentration des précipitations mensuelles (ICPM). Huit zones climatiques ont été détectées par analyse descriptive des données.

Huit stations représentatives ont été sélectionnées par zone et ont fait l'objet de l'analyse du RclimDex, qui a consisté à des modélisations économétriques des séries temporelles de 24 d'indices d'extrêmes climatiques. Les résultats obtenus révèlent une tendance généralisée aux fortes températures et une diminution globale de la pluviométrie sur toute la région.

A Natitingou, le minimum des températures nocturnes diminue significativement et justifie les conditions de froid extrême pendant les nuits tandis que Kandi se réchauffe considérablement, avec les séquences chaudes qui s'allongent. Notons que cette région centrale du Bénin subit un réchauffement intense et accéléré aussi bien la nuit que le jour.

Mots clés : tendances des indices d'extrêmes de précipitations et de températures, RclimDex, changement climatique, ICPM, et zones climatiques.

Table des matières

Table des matières	12
1 INTRODUCTION GENERALE	13
1 Contexte scientifique	13
2 Clarification conceptuelle	14
3 Revue de littératures	17
4 Problématique	20
4.1 Questions de recherche	20
4.2 Hypothèses de recherche	20
4.3 But de la recherche	21
4.4 Objectif global	21
4.5 Objectifs spécifiques	21
5 Grandes lignes du mémoire	21
2 Région d'étude, données, méthodes et outils	22
1 Région d'étude	22
1.1 Localisation	22
1.2 Relief	22
1.3 Végétation	23
1.4 Climat	23
1.4.1 Précipitations	23
1.4.2 Température	23
1.5 Fleuves	23
1.6 Démographie	24
2 Données	24
3 Méthodes	28
3.1 Paramètres d'analyse de la variabilité des précipitations	28
3.1.1 Indice de variabilité interannuelle du cumul des précipitations	28
3.1.2 Indice de concentration des précipitations mensuelles (ICPM)	28
3.1.3 Variabilité intra-saisonnière : cycle saisonnier	29
3.2 Indices des extrêmes de précipitations et de températures	30
3.2.1 Définitions des onze indices des extrêmes de précipitations	30

3.2.2	Définitions des 13 indices des extrêmes de températures	32
3.3	Méthodes statistiques d'analyse des paramètres climatiques	34
3.3.1	Méthode non-paramétrique : test de significativité de tendance de Mann-Kendall	34
3.3.2	Analyse multidimensionnelle des données	36
3.3.2.1	Analyse en composantes principales (ACP)	36
3.3.2.2	Classification ascendante hiérarchique (CAH)	36
4	Outils	37
3	Résultats et analyses	39
1	Variabilité des précipitations au Bénin, de 1955 à 2016	39
1.1	Variabilité de l'indice de concentration de précipitations mensuelles (ICPM) : découpage de la région d'étude en zones climatiques	39
1.2	Variabilité du cumul interannuel	44
1.3	Variabilité intra-saisonnière : cycle saisonnier	47
1.4	Tendance des indices des extrêmes de précipitations	51
2	Variabilité des températures au Bénin, de 1955 à 2016	59
2.1	Climatologie des moyennes mensuelles de températures	59
2.2	Tendances des moyennes annuelles de températures	60
2.3	Tendances des indices des extrêmes de températures	62
3	Limites des résultats	66
4	Conclusion et perspectives	67
5	Annexes	69
6	Références	71

INTRODUCTION GENERALE

1 Contexte scientifique

Les dernières années du XXe siècle ont été marquées par de multiples ateliers de réflexions sur les inquiétudes relatives au réchauffement climatique. A cause de l'augmentation continue de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ayant pour corollaire des températures de plus en plus élevées. On estime à $0,13 \pm 0,03^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ la vitesse de réchauffement à la surface du globe sur la période de 1956 à 2005 (GIEC, (2007)). Au nombre des déséquilibres qu'engendre ce réchauffement au sein du système climatique, on cite entre autres : la montée du niveau des mers, l'augmentation des températures à la surface des océans, la fonte de la banquise arctique, etc. Ces différents indicateurs témoignent de la dynamique de changement climatique à l'échelle planétaire. Cependant, le climat peut varier d'une zone géographique à une autre.

En Afrique de l'Ouest par exemple, les décennies sèches de 70 et 80, marquées par les pics secs des années 1973-74 et 1984-85 ont entraîné de graves crises alimentaires et sanitaires qui perdurent encore aujourd'hui avec la régularité des années déficitaires en pluviométrie (Bacci et al., (2010)). Notons qu'il n'est pas uniquement question de déficit pluviométrique, mais aussi et surtout des extrêmes pluviométriques, car la problématique des précipitations intenses et des phénomènes hydrologiques extrêmes associés demeure très préoccupante. En effet, les extrêmes pluviométriques que sont : la sécheresse et les excès de pluies sont susceptibles de provoquer d'importantes nuisances aux populations et l'économie. Les difficultés d'adaptation des pays les plus pauvres (comme ceux de l'Afrique de l'ouest) au réchauffement climatique et les enjeux majeurs liés aux domaines énergétique, environnemental, humain et agricole, suscitent de la part de la communauté scientifique une remobilisation pour rechercher des solutions conséquentes.

Au Bénin, le secteur agricole très prépondérant est particulièrement menacé. Le GIEC projette une diminution de 5 et 20 % des productions agricoles qui pourrait entraîner des risques sur la sécurité alimentaire (Boko et al., (2012)). Par ailleurs, les périodes prolongées de sécheresse fragilisent le système de production d'énergie électrique essentiellement hydraulique et tend à renforcer la dépendance énergétique du Bénin par rapport aux pays fournisseurs. D'autre part, le pays étant côtier, il est directement exposé à l'élévation du niveau de la mer. La conséquence serait la perte au sud d'environ 10,6 % de sa superficie, et où vivent 3.662.000 habitants (INSAE, 2003). Le Nord, plus soumis aux extrêmes pluviométriques, subit les conséquences des sécheresses régulières et des

inondations sporadiques. Dans un contexte de variabilité spatiale, surtout suivant la latitude, le changement climatique doit se manifester différemment dans les diverses régions du territoire.

Dans ce contexte, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a constitué une équipe d'expert – dénommé, en Anglais, Expert Team on Climate Change Detection Indices (ETCCDI) – chargé du suivi et de la détection des indices du changement climatique dans le monde. Cette équipe a proposé 24 indices climatiques d'extrêmes de températures et de précipitations. Zhang and Yang (2004) ont développé un package sous le logiciel R (RclimDex) permettant : de calculer, pour chaque station, la série chronologique ces indices ; d'évaluer leurs tendances linéaires ; et d'établir les seuils significativité statistique de ces tendances. Ces codes ont été abondamment utilisés dans la littérature, on peut citer, en Amérique (Aguilar et al. (2005)), sur le globe (Alexander et al. (2006)) en Asie-Pacifique (Choi et al. (2009)), en Afrique de l'ouest (Oguntunde et al. (2011), Hountondji et al. (2011), Soro et al. (2016), De Longueville (2016), Attogouinon et al. (2017), N'Tcha M'Po (2017), Houngouè et al. (2019)). C'est dans ce contexte et dans le cadre de notre stage de master de recherche que ce thème « Diagnostic statistique de la variabilité spatio-temporelle des extrêmes climatiques de précipitations et de températures au Bénin de 1955 à 2015 » a été défini pour nous.

But de la recherche : Cette recherche est alimentée par des investigations et outils statistiques dans le domaine de la climatologie en république du Bénin, dans le but de déterminer les variabilités moyennes des caractéristiques physiques, température et précipitation de 1955 à 2015.

2 Clarification conceptuelle

Avant tout, il importe que nous clarifiions quelques concepts relatifs à notre thème de recherche. Dans ce travail, les paramètres physiques de l'atmosphère ayant fait l'objet d'analyses statistiques sont précipitation et température. Le travail se déroule également dans le contexte de changement climatique pour lequel quelques précisions méritent d'être faites.

Système climatique : Il est composé de : l'atmosphère ; l'hydrosphère (océans, mers, fleuves, ...) ; la cryosphère (banquises, glaciers, calottes, ...), de la biosphère (organismes vivants) et de la lithosphère (croûte terrestre).

Atmosphère terrestre : C'est enveloppe gazeuse protectrice entourant la terre, elle est principalement composée d'azote et d'oxygène mais aussi de vapeur d'eau et de gaz carbonique. Elle joue un grand rôle dans la régulation de l'influence des rayons solaires sur la surface terrestre. C'est dans l'atmosphère que se concentre les gaz à effet de serre (GES) principalement produits par l'activité industrielle.

Effet de serre : L'atmosphère terrestre laisse passer une partie du rayonnement solaire qui réchauffe la surface du globe. Le rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre est capturé par les GES (la vapeur d'eau et les gouttelettes d'eau des nuages (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone (O₃), et les hydrocarbures halogénés produits

par l'industrie, parmi lesquels on peut citer : les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrofluorocarbures (HFC), le tétrafluorométhane (CF₄), etc.). Par les mécanismes d'absorption et de vibration de leurs molécules, ces gaz réémettent ces rayonnements dans toutes les directions. La partie de ce rayonnement alors redirigée vers la surface du globe, piège de l'énergie dans les basses couches de l'atmosphère. Cette énergie renforce le réchauffement terrestre dû au rayonnement solaire : c'est ce phénomène naturel qui est appelé effet de serre (Cassou et Masson-Delmotte (2015)).

Climat : C'est la distribution statistique des données (température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent.) de l'état l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée (annuelles et mensuelles). La climatologie est la science qui s'occupe de l'étude du climat. Elle se distingue de la météorologie qui s'occupe de l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelles. Les analyses de la climatologie permettent de classer les climats des différentes régions du monde selon leurs caractéristiques principales. Le climat a varié fortement au cours de l'histoire de la terre sous l'influence de nombreux phénomènes astronomiques, géologiques, etc., et plus récemment sous l'effet des activités humaines (réchauffement climatique).

Réchauffement climatique ou réchauffement planétaire : C'est le phénomène d'augmentation des températures moyennes océaniques et atmosphériques, dû en partie à l'émission excessive des GES.

Variabilité climatique : Elle désigne les différentes évolutions normales du climat ou provenant de causes naturelles. Il est important de distinguer les expressions variabilité et variation. La variabilité traduit un caractère changeant prévisible mais difficile à évaluer statistiquement tandis que la variation est un changement, une fluctuation, un écart d'amplitude ou d'intensité souvent non prévisible. La variabilité du climat peut être spatiale ou temporelle.

Changement climatique : Il traduit les modifications de la variabilité du climat. Cette expression est utilisée généralement et/ou conventionnellement pour désigner le réchauffement climatique ou l'occurrence d'événements extrêmes tels que les fortes températures et la sécheresse dû à l'influence des activités humaines.

Saison : C'est une période qui divise l'année non seulement en fonction de certaines constantes du climat mais aussi en fonction de la végétation. On parle du cycle saisonnier ou du changement périodique du climat. Dans certaines zones, on observe deux à quatre saisons. Le sahel par exemple, connaît une saison sèche et une saison pluvieuse. Les zones de climat tempéré quant à elles, se caractérisent par une succession de quatre saisons bien marquées (hiver, printemps, été et automne).

Répartition des zones climatiques : Elle est principalement dictée par la latitude. On se base sur les conditions d'ensoleillement (durée du jour, incidence des rayons solaires) et l'alternance des saisons, pour déterminer les zones climatiques. Mais bien d'autres facteurs entrent aussi en compte, comme le relief, les vents dominants et l'altitude (élévation par rapport au niveau moyen de la mer).

Zones tropicales : Ce sont les régions situées de part et d'autre de l'équateur caractérisées par

de fortes températures, dues à l'ensoleillement continu. Deux zones climatiques y sont différenciées par la répartition annuelle des précipitations : le climat tropical d'humidité abondante et constante, favorisant le développement des forêts équatoriales ; et le climat tropical humide et sec, connaissant une saison pluvieuse marquée par des pluies de mousson, tandis que la sécheresse domine pendant l'hiver que connaît les zones tempérées. Il se retrouve en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie, (D'Amico, (2007)).

Événements extrêmes : Les variations ou changements que connaissent les températures et les précipitations sont parfois différentes d'une région à une autre. Les périodes de pluviométrie intense, de rareté pluviométrique, de même que les seuils très faibles et très élevés de températures sont qualifiés d'extrêmes climatiques ou d'événements extrêmes. Ils traduisent des fluctuations importantes de la variabilité du climat pouvant se produire sous forme de vents, températures ou précipitations. Les seuils de température caniculaire, les tempêtes, les feux de forêt, les cyclones, les ouragans, les typhons et les vents violents sont des événements extrêmes.

Mesure de la température : Mesurée à l'aide d'un thermomètre et souvent exprimée en degré Celsius, c'est une valeur qui exprime la nature chaude ou fraîche de l'air ambiant. Afin de mesurer la température dans des conditions absolument standards, il est indispensable que le thermomètre soit toujours dans le même environnement. C'est pourquoi l'appareil est placé dans un abri météorologique, le plus neutre possible, donc peint en blanc et dans lequel il est justement protégé des précipitations, des rayonnements solaire et infrarouge. Pour éviter tout biais, la base de l'abri est installée sur un sol naturel à végétation basse (idéalement un gazon) et le capteur de température est placé à environ 1,50 mètre du sol. Les météorologistes disposent ainsi de la température minimale (relevée à 6h) et maximale (relevée à 18h), moyenne enregistrée au cours des dernières 24 heures.

Mesure des précipitations : La quantité de précipitation désigne l'ensemble des eaux qui tombent sur la surface de la terre tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées (rosée, gelée blanche, givre). Pour mesurer les hauteurs de précipitations (ou des "lames de précipitations"), on utilise un pluviomètre dont le principe consiste tout simplement à canaliser les précipitations pour en mesurer le volume ou la masse (manuellement ou automatiquement). L'unité utilisée est le mm (millimètre). Un millimètre de précipitation équivaut à un litre d'eau par mètre carré. Les pluviomètres automatiques utilisent :

- le principe à auget basculeur : une cuillère équipée d'un ressort ou un auget double compartiment autour d'un axe bascule pour une masse d'eau précise ;
- le principe par pesée : une balance mesure l'évolution de la masse de précipitations canalisées ;
- le principe optique : La variation d'amplitude et de durée du séjour d'une goutte d'un faisceau d'ondes permettent de mesurer respectivement le diamètre des gouttes d'eau et leur vitesse de chute. Ces appareils sont connus sous le nom de spectro-pluviomètre optique.

3 Revue de littératures

Nous présentons dans cette section le résumé de quelques articles relatifs à l'étude des tendances des indices des extrêmes de températures et de précipitations dans diverses régions de monde.

Alexander et al. (2006) ont analysé une série d'indices de changement climatique de données journalières de températures et de précipitations, principalement axées sur les événements extrêmes, à partir de données recueillies dans différents pays du monde, sur la période 1901 à 2003. Les 27 indices sont calculés (RCLimDex et FClimDex) pour environ 200 stations de températures et 600 stations de précipitations et analysés sur les périodes 1901–1950, 1951–1978 et 1979–2003. En définissant une formule exacte pour chaque indice et à l'aide d'un logiciel spécialement conçu, les analyses effectuées dans différents pays ont été combinées de manière transparente. Cela a permis la présentation d'un tableau mondial le plus à jour et le plus complet des tendances des indices de températures de précipitations extrêmes. Les indices saisonniers et annuels pour la période 1951–2003 ont été maillés. Les tendances dans les champs maillés ont été calculés et statistiquement testés. Les résultats ont montré des changements importants et généralisés des températures extrêmes associés au réchauffement, en particulier pour les indices dérivés des températures minimales journalières. Plus de 70 % de la superficie mondiale échantillonnée a montré une diminution significative de l'occurrence annuelle de nuits fraîches et une augmentation significative de la fréquence annuelle de nuits chaudes. Certaines régions ont plus que doublé pour ces indices par rapport à la moyenne. Cela implique une tendance positive dans la distribution des températures minimales journalières dans le monde entier. Les températures maximales journalières ont connues des changements similaires mais avec des vitesses plus faibles. Les indices de précipitation ont montré une augmentation généralisée et significative, mais les changements sont beaucoup moins spatialement cohérents par rapport au changement de température.

Des suites des recommandations d'un atelier régional sur les changements climatiques qui s'est tenu au Guatemala en novembre 2004, Aguilar et al. (2005) ont analysé des indices d'extrêmes de températures et de précipitations sur la région Américaine (le Nord, le Centre et le Sud), sur la période 1961–2003. L'analyse de ces indices révèle une tendance générale au réchauffement dans la région. L'occurrence de températures maximales et minimales extrêmement chaudes a augmenté tandis que les événements de températures extrêmement froides ont diminué. Indices de précipitations, malgré la variabilité spatiale attendue, indiquent que bien qu'aucune augmentation significative des cumuls annuels n'a été observée, les événements pluvieux s'intensifient et la contribution des jours humides et très humides s'accroît. Les indices de températures et de précipitations sont corrélés avec les températures de surface de la mer de l'océan Atlantique nord et équatorial et de l'océan Pacifique. Cependant, les indices présentant les tendances significatives les plus importantes (pourcentage de journées chaudes, l'intensité des précipitations et la contribution des jours très humides) ont de faibles corrélations avec El Niño – Oscillation australe. De plus, les indices

de précipitations montrent une corrélation avec les températures de surface de la mer de l'océan Atlantique tropicale.

Choi et al. (2009) ont examiné pour la période 1955-2007 les profils spatio-temporels des changements dans les événements extrêmes de températures et de précipitations sur 143 stations météorologiques dans dix pays du Réseau Asie-Pacifique (APN). Les résultats indiquent qu'il y a eu de façon saisonnière (Hiver et Été) et annuelle des changements asymétriques des événements de température extrêmes par rapport aux augmentations récentes des moyennes de température dans la région APN. Au cours de la période, il n'y a pas de tendances régionales systématiques du cumul annuel de précipitations, ou de la fréquence et de la durée des événements extrêmes de précipitations. Des tendances statistiquement significatives des événements de précipitations extrêmes sont observées sur moins de 30 % des stations, indiquant ainsi une absence de schéma de changement spatialement cohérent. En ce qui concerne des événements de températures extrêmes, des changements statistiquement significatifs se sont produits sur plus de 70 % de toutes les stations, formant ainsi un motif de changement cohérent.

Soro et al. (2016) ont examiné les tendances six indices d'extrêmes de précipitations sur la Côte d'Ivoire, de 1942 à 2001. L'examen s'est porté sur les données journalières 44 stations et celles horaires de 10 stations réparties sur toute l'étendue du territoire. Pour les pluies journalières, les indices analysés sont : le nombre de jours pluvieux (cumul supérieur à 10mm et 20mm) consécutifs ; le maximum de cumul journalier (dans l'année et dans un mois) ; le nombre jours dont les cumuls sont supérieurs à (10mm et 20mm). Deux méthodes d'analyse de tendances sont utilisées : le test non paramétrique de Mann-Kendall et la méthode de régression linéaire. Les résultats montrent que très peu de tendances à la baisse statistiquement significatives peuvent être détectés aux échelles horaires et journalières. On note quelques tendances à la baisse des indices précipitations extrêmes qui sont localisées au sud et au sud-est.

De Longueville et al. (2016) ont analysé les tendances des indices climatiques classiques (Rclim-Dex) de températures et de précipitations en combinaison avec l'analyse des indices de la saison pluvieuse afin de mieux mettre en évidence les différents angles de variabilité et de changement climatique observés au Burkina Faso depuis 1950. Au regard de l'analyse des températures, les résultats montrent qu'il ne fait aucun doute que le réchauffement climatique affecte toutes les régions du pays. Concernant les précipitations, la diminution des cumuls annuels s'avère être le changement le plus significatif. Ceci est cohérent avec les résultats d'autres études qui se sont déroulées sur d'autres zones de la sous-région. Malgré cette tendance négative des cumuls annuels sur toutes les stations, cette étude démontre que la majorité des stations ont enregistré une reprise des précipitations ces dernières années. Cependant, les niveaux de précipitations enregistrés en 2013 sont encore loin d'être ce qu'ils étaient avant les grandes sécheresses. L'examen des événements extrêmes montre une stabilité globale de la fréquence et dans l'intensité de ces événements. Par ailleurs il est noté une augmentation de la moyenne de précipitations pour les jours de pluie, une augmentation

du maximum de jours secs consécutifs, une diminution du maximum de jours de pluie consécutifs, une quasi-stabilité des jours très pluvieux et extrêmement pluvieux. Tout ceci indique donc des changements dans la configuration du régime pluviométrique. Puisqu'il n'y a pas d'augmentation significative des événements extrêmes, il est probable que les impacts socio-économiques généralement présentés comme les conséquences directes du changement climatique et qui sont de plus en plus observées affectant les habitants du Burkina Faso ne peuvent être attribués au seul changement climatique.

L'analyse avec le RclimDex des tendances, de 1960 à 2000, de douze indices des extrêmes de précipitations a été menée au Bénin par Hountondji et al. (2011), à partir des données journalières de précipitations de 21 stations réparties du nord au sud. Dans cette étude, seules les années sans lacunes ont été prise en compte. Les résultats montrent que seul le cumul annuel de précipitations, le nombre annuel de jours de pluvieux (cumul supérieur ou égal à 1mm) et le maximum de cumul mensuel de précipitations présentent une tendance décroissante significative, tandis que les neuf autres indices de précipitations semblent rester stable. Ils indiquent que ces résultats sont une découverte majeure pour le Bénin car des rares travaux réalisés dans la région de l'Afrique de l'Ouest décrivent une situation plus sujette à une augmentation des précipitations extrêmes (au Nigéria) ou l'inverse (en Guinée Conakry et au Niger) dans un contexte similaire d'une nette réduction de la quantité annuelle de précipitations.

Dans cette étude, réalisée par Attogouinon et al. (2017), portant sur la Haute vallée de l'Ouémé au Bénin, les données de pluies journalières couvrant la période 1951-2014 ont été analysées en utilisant les indices d'extrêmes climatiques du RclimDex. Les résultats indiquent une absence de tendance claire de l'évolution des indices climatiques sur presque toutes les stations. Il est aussi observé une légère baisse des séquences sèches des années 1970 et 1980, révélées dans la région par des études antérieures.

N'Tcha M'Po et al. (2017) ont analysé les tendances des indices des extrêmes de précipitations journalières sur le tout bassin de l'Ouémé, en utilisant : les données historiques de précipitations journalières de 35 stations, sur la période 1950-2014 ; et données futures du modèle climatique régional REMO, sur la période 2015-2050, sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les indices d'extrêmes climatiques ont été calculés à l'échelle annuelle et saisonnière. Le test non paramétrique de Mann-Kendall et l'approche de régression linéaire paramétrique ont été utilisés pour la détection des tendances. Il en ressort une baisse significative du nombre de jours de fortes et très fortes précipitations et du nombre jours pluvieux consécutifs et du cumul annuel de précipitations, sur la période historique, de même que sur la période future avec le scénario RCP8.5. Par ailleurs, on note très peu de tendances significatives avec le scénario RCP4.5.

Cette étude réalisée par Houngoué et al. (2019) porte sur l'analyse des tendances en matière de précipitations, d'évaporations, de températures, d'humidités relatives, de vitesses du vent et de durée d'ensoleillement sur le delta de l'Ouémé au Bénin. Huit indices basés sur la température et

quinze indices basés sur les précipitations sont calculés sur la période 1960-2016. Les résultats ont montré une intensification des fortes précipitations sur le delta de l'Ouémé. De plus, une tendance à la hausse significative est détectée pour les températures, preuve du réchauffement climatique.

4 Problématique

On constate, à travers la revue de littératures, que partout dans le monde, les tendances des indices des extrêmes de températures sont en majorité significatives et en faveur d'un réchauffement de la terre depuis au moins 1950. Par contre, pour les précipitations, très peu d'indices ont une tendance significative. De même pour les indices de tendances significatives, très peu de stations sont concernées et structure spatiale est soit locale ou incohérente. Pour ce qui concerne le Bénin, les deux travaux les plus spatialement étendus ce sont déroulés à des périodes différentes : 1960-2000 et 21 stations pour tout le pays par Hountondji et al. (2011) ; 1950-2014 et 35 stations sur la vallée du fleuve Ouémé uniquement, N'Tcha M'Po et al. (2017), les résultats à peu près concordants. Par contre, pour des travaux qui se sont déroulés dans de petites zones et des périodes différentes : dans la Haute vallée de l'Ouémé au Bénin, sur la période 1951-2014 par Attogouinon et al. (2017) ; dans le delta de l'Ouémé au Bénin, sur la période 1960-2016 par Houngouè et al. (2019), les résultats sont divergents.

4.1 Questions de recherche

Au vu de l'analyse de la revue de littératures, l'une des questions scientifiques qui se dégage est : la divergence des tendances indices des extrêmes de précipitations est-elle liée aux zones climatiques ou aux périodes d'étude ?

4.2 Hypothèses de recherche

Pour ce qui concerne la précipitation, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : Il est possible de définir des zones climatiques à partir de la variabilité spatiale de l'indice de concentration des précipitations mensuelles.
- Hypothèse 2 : La définition des zones climatiques peut permettre d'expliquer la variation des tendances des indices des extrêmes de précipitations au Bénin.
- Hypothèse 3 : Les périodes d'étude peuvent expliquer la variation des tendances des indices des extrêmes de précipitations au Bénin.

En ce qui concerne la température, nous émettons l'hypothèse suivante :

- Hypothèse 4 : Notre étude confirme les tendances des indices des extrêmes de températures annoncées par les auteurs précédents au Bénin.

4.3 But de la recherche

Par cette recherche, nous comptons, d'une part, apporter une explication aux variations des tendances historiques des indices des extrêmes de précipitations au Bénin, et d'autre part, confirmer ou infirmer les tendances historiques des indices des extrêmes de températures au Bénin.

4.4 Objectif global

L'objectif de cette recherche est d'analyser la variabilité et la variation spatio-temporelle des indices des extrêmes de précipitations et de températures au Bénin, de 1955 à 2016.

4.5 Objectifs spécifiques

De manière spécifique, nous allons :

- Définir des zones climatiques au Bénin, à partir de l'analyse de la variabilité spatiale de l'indice de concentration des précipitations mensuelles ;
- Expliquer la variation des tendances des indices des extrêmes de précipitations au Bénin avec les zones climatiques ou avec les périodes d'étude
- Confirmer ou infirmer les tendances des indices des extrêmes de températures au Bénin.

5 Grandes lignes du mémoire

Après ce chapitre introductif où nous avons présenté entre autres les objectifs de la recherche, nous avons décrit dans le deuxième chapitre la région d'étude, les données utilisées, méthodes statistiques et outils. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats et leurs analyses. A la fin, nous avons tiré une conclusion et présenté les perspectives.

RÉGION D'ÉTUDE, DONNÉES, MÉTHODES ET OUTILS

1 Région d'étude

1.1 Localisation

Le Bénin est l'un des pays côtiers de la région ouest-africaine. Cette région comprend non seulement les pays côtiers, mais également les pays couverts par le fleuve Niger et le désert sahélien. Dans sa situation géographique, ce pays s'étend sur 700 km du fleuve Niger (au nord) à la côte atlantique (au sud) et couvre une superficie de 114.764 km². A l'échelle du globe, on situe tout le Bénin entre l'équateur et le tropique du Cancer, plus précisément entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude Nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude Est. Du nord au sud, le pays s'étend sur 700 Km. En termes de longitude, le nord du pays est plus vaste, ainsi entre Tanguiéta et Ségbana (au nord sahélien), la distance est de 325 km tandis que le long de la côte, elle est de 125 Km. Le Bénin est limité au nord 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. On remarque ainsi, que tout le sud du Bénin longe la côte et que le Niger et son fleuve limite principalement le Nord-Bénin.

1.2 Relief

Ce pays au relief peu accidenté regorge essentiellement de plaines, de Collines et de montagnes. Le Sud est une zone sablonneuse plane et basse (plaine) parsemée de lacs, lagunes et marécages, à savoir la basse vallée de l'Ouémé, la lagune de Porto-Novo et le lac Nokoué. Les plaines côtières méridionales sont les plus habitées et on y retrouve les deux grandes capitales du pays, Porto-Novo et Cotonou. Par ailleurs, les collines représentent la principale roche du centre du pays, d'où le nom donné au département des « Collines ». En revanche, au nord, on remarque les savanes semi-arides et la chaîne de l'Atacora qui se prolonge jusqu'au Niger d'une part et au Togo et au Ghana d'autre part. Le mont Sagbarao est la plus haute montagne du pays avec ses 800 mètres de hauteur, suivi du mont Aledjo avec ses 658 mètres.

1.3 Végétation

Le Bénin est caractérisé par trois types de végétation à savoir : la forêt du Sud, la savane au Centre avec des essences comme l'Acajou, l'Iroko et la Samba, puis la savane arborée dans les régions soudanaises du Nord.

1.4 Climat

Du sud au nord du pays, le climat n'est pas le même. En effet, le Sud connaît une humidité plus constante et forte. Les saisons sèches et pluvieuses s'alternent comme suit : de novembre à mars on note la grande saison sèche, d'avril à mi-juillet la grande saison pluvieuse, de mi-juillet à mi-septembre la petite saison sèche et enfin de mi-septembre à octobre la petite saison pluvieuse. Du centre au nord, on note une saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de juin à septembre. En outre, deux vents saisonniers soufflent sur cette zone de climat intertropical : l'harmattan, vent chaud et sec en provenance du Sahara, soufflant sur toute l'étendue du territoire pendant la saison sèche ; la mousson océanique chargée d'humidité, et soufflant d'avril à novembre, du sud-ouest.

1.4.1 Précipitations

Chaque année, on enregistre 900 à 1300 mm de pluie. La zone côtière est l'une des plus arrosées de même que le centre du pays. Au nord, Natitingou et Djougou font partie des villes les plus arrosées de l'Atacora.

1.4.2 Température

En termes de caractéristiques thermiques, Cotonou enregistre des températures plus faibles que le nord. En effet, la température maximale diminue au fur et à mesure qu'on quitte le Nord pour le Sud. En saison sèche Kandi enregistre des températures supérieures à 32 degrés, tandis qu'à Cotonou, elles varient entre 28 et 32 degrés.

1.5 Fleuves

Plusieurs cours d'eau traversent le pays. Le bassin béninois du fleuve Niger qui comprend les rivières :

- le Mékrou : 480 km ;
- l'Alibori : 427 km ;
- la Sota : 254 km ;
- et la Pendjari.

Le bassin de la Volta qui comprend :

- le Pendjari (420 km) ;
- le Perma.

Le bassin du Mono-Couffo qui comprend :

- le Couffo : fleuve de 190 km (dont 170km au Bénin), et qui se jette dans la lagune Ahémé qui, elle-même, se jette dans l’océan Atlantique ;
- le Mono : avec ses 500 km, il sert de frontière entre le Bénin et le Togo sur son cours inférieur et se jette ensuite dans l’océan Atlantique.

Le bassin de l’Ouémé : avec ses 608 km, l’Ouémé se jette dans la lagune Nokoué et utilise les chenaux de Lagos et de Cotonou pour communiquer avec l’océan Atlantique. On compte aussi plusieurs plans d’eau dans le sud à savoir :

- le lac Nokoué : 138 km² ;
- le lac Ahémé : 78 Km² ;
- et la lagune de Porto-Novo : 35 km².

1.6 Démographie

Selon une estimation de juillet 2020, le Bénin compte à cette date 12 864 634 habitants. Le sud est la région la plus habitée.

2 Données

Les données utilisées dans cette étude sont celles de l’Agence Météo-Bénin. Il s’agit des données de précipitations journalières de 45 stations pluviométriques (Figure 2-1 et Tableau 2-1) et celles de températures journalières (minimales et maximales) des 06 stations synoptiques que sont Cotonou, Bohicon, Savè, Parakou, Natitingou et Kandi. Ces données couvrent pour la plupart la période de 1955 à 2016. Les données de températures présentent un très faible taux de valeurs manquantes pour les 06 stations synoptiques, sur toute la période. Sur les soixante-et-deux (62) années, toutes les stations disposent d’au moins 60 ans de données de températures. Par contre, pour les données de précipitations, plusieurs stations manquent des données sur plusieurs années (qui peut atteindre environ deux décennies). Par ailleurs, pour certaines années dont les données sont disponibles, on note plusieurs journées de données manquantes. Ne disposant pas d’autres données de précipitations, pour procéder la correction des données manquantes, nous avons tout simplement considéré comme année manquante toute année dont les données manquantes dépassent 62 jours. Ainsi, toutes les stations ayant moins de 40 années (sur les 62 années de la période considérée) de données disponibles, ne sont pas pris en compte dans les analyses. Il s’agit des stations pluviométriques de Athiémé, Kérou et Ségbana. Ainsi, dans la suite de l’étude, ce sont les données de 42 stations pluviométriques sur les 45 qui ont été utilisées.



FIGURE 2.1 – Carte de la région d'étude (le Bénin) et les stations pluviométriques

TABLE 2.1 – Stations pluviométriques et les coordonnées géographiques

Stations	Latitude	Longitude	Département	Région	Période	NA
Abomey	7.18333	1.98333	Zou	Centre	1955-2016	2
Adjohoun	6.7	2.48333	Oueme	Sud	1955-2016	1
Allada	6.65	2.13333	Atlantique	Sud	1955-2016	18
Aplahoue	6.91667	1.66667	Couffo	Sud	1955-2016	1
Athieme	6.59352	1.6769	Mono	Sud	1955-2016	31
Banikoara	11.3	2.43333	Alibori	Nord	1955-2016	1
Bante	8.41667	1.88333	Collines	Centre	1955-2016	3
Bassila	9.0227	1.66554	Donga	Nord	1955-2016	17
Bembereke	10.2	2.66667	Borgou	Nord	1955-2016	1
Beterou	9.2	2.26667	Borgou	Nord	1955-2016	6
Birni	9.99072	1.52659	Atacora	Nord	1955-2016	18
Bohicon	7.2	2.05	Zou	Centre	1955-2016	0
Bopa	6.56667	1.96667	Mono	Sud	1955-2016	1
Boukoumbe	10.16667	1.1	Atacora	Nord	1955-2016	22
Cotonou	6.35	2.43	Littoral	Sud	1955-2016	7
Dassa	2.16667	2.16667	Collines	Centre	1955-2016	7
Djougou	9.7	1.66667	Donga	Nord	1955-2016	11
Dogbotota	6.75	1.78333	Couffo	Sud	1955-2016	5
Grandpopo	6.28333	1.81667	Mono	Sud	1955-2016	4
Ina	9.96636	2.72728	Borgou	Nord	1955-2016	10
Kalale	10.29007	3.38167	Borgou	Nord	1959-2016	9
Kandi	11.13	2.93	Alibori	Nord	1955-2016	0
Kerou	10.82483	2.11	Atacora	Nord	1956-2016	30

"NA" : nombre d'années manquantes

Stations	Latitude	Longitude	Département	Région	Période	NA
Ketou	7.36131	2.60643	Plateau	Sud	1955-2016	1
Kouande	10.33185	1.69241	Atacora	Nord	1955-2016	4
Lonkly	7.15	1.65	Couffo	Sud	1957-2016	3
Nikki	9.93333	3.2	Borgou	Nord	1955-2016	13
Okpara	9.10026	2.73189	Borgou	Nord	1957-2016	3
Ouidah	6.36667	2.1	Atlantique	Sud	1955-2016	5
Parakou	9.35	2.61	Borgou	Nord	1963-2016	0
Pobe	6.93333	2.66667	Plateau	Sud	1955-2016	2
Portonovo	6.48333	2.61667	Oueme	Sud	1955-2016	3
Sakete	6.71667	2.66667	Plateau	Sud	1955-2016	1
Savalou	7.93351	1.96435	Collines	Centre	1955-2016	10
Malanville	11.8667	3.36667	Alibori	Nord	1955-2016	6
Natitingou	10.31	1.38	Atacora	Nord	1955-2016	1
Niaouli	6.7	2.11667	Atlantique	Sud	1955-2016	1
Save	8.01	2.48	Collines	Centre	1955-2016	0
Segbana	10.9293	3.6918	Alibori	Nord	1955-2016	24
Seme	6.36667	2.63333	Oueme	Sud	1955-2016	11
Tanguieta	10.61712	1.26656	Atacora	Nord	1955-2016	9
Tchaourou	8.86667	2.6	Borgou	Nord	1955-2016	16
Toffo	6.83333	2.05	Atlantique	Sud	1955-2016	11
Toui	8.68422	2.58874	Collines	Centre	1955-2016	3
Zagnanado	7.25	2.33333	Zou	Centre	1955-2016	6

"NA" : nombre d'années manquantes

3 Méthodes

3.1 Paramètres d'analyse de la variabilité des précipitations

3.1.1 Indice de variabilité interannuelle du cumul des précipitations

L'indice de Lamb (1982) est souvent utilisé pour analyser la variabilité interannuelle de la quantité de précipitation. Il se calcule à chaque station, à partir des cumuls annuels, sur une période donnée. Il est défini par la formule suivante :

$$I(i) = \frac{CA_i - \bar{CA}}{\bar{CA}} \quad (2.1)$$

Dans cette expression, CA_i est le cumul annuel de l'année i à une station donnée, et sont respectivement la moyenne et l'écart-type des cumuls annuels à cette station, sur une période donnée. Cet indice permet de distinguer, sur le période d'étude, les années normales des années déficitaires et excédentaires. Une année est dite normale si son indice est compris entre -1 et 1. Une année est dite déficitaire ou sèche (respectivement excédentaire ou humide) si son indice est inférieur à -1 (respectivement supérieur à 1). Avant de calculer les cumuls annuels, les lacunes journalières ont été tout simplement remplacées par zéro.

3.1.2 Indice de concentration des précipitations mensuelles (ICPM)

L'indice de concentration des précipitations mensuelle (ICPM) a été proposé par Oliver (1980) et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$ICP_{annuel} = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} p_i)^2} * 100, \quad (2.2)$$

avec p_i les précipitations mensuelles du mois i ($i = 1, \dots, 12$).

Il se calcule à partir des cumuls mensuels d'une station, sur une période (saison ou année). C'est un paramètre de dispersion temporelle qui indique le degré de concentration ou d'homogénéité des précipitations sur une période. Il existe toute une variété d'indicateurs empiriques de mesure de dispersion ou de concentration dont les plus connus sont : l'écart-type ou l'écart quadratique moyen, noté σ ; le carré de l'écart-type appelé variance ; le coefficient de variation CV qui est le rapport de l'écart-type par la moyenne arithmétique. Il est aisé d'établir le lien entre le coefficient de variation CV et l'indice de concentration des précipitations mensuelle (ICPM) :

$$ICPM = \frac{100}{12} [1 + (\frac{CV}{100})^2] \quad (2.3)$$

Michiels et al. (1992) ont montré que lorsque les précipitations sont équitablement réparties sur les douze mois de l'année, $ICPM = 100/12 = 8,33$ (parce que $CV = 0$). Lorsque toutes les précipitations

sont concentrées sur un seul mois de l'année, $ICPM=100$ (parce que $CV = 100\sqrt{11}$). Ces valeurs sont donc les limites théoriques du ICPM. Par ailleurs, Michiels et al. (1992) ont montré que lorsque les précipitations sont équitablement réparties sur entre m mois de l'année, $ICPM=100/m$. Selon Oliver (1980) et Michiels et al. (1992), on peut classer ICPM en quatre catégories de distributions, en fonction de ses valeurs (voir tableau 2-2)

TABLE 2.2 – Niveaux de distribution des précipitations de l'ICPM

N°	ICPM	Type de distribution
1	$ICPM < 11$	Distribution uniforme de précipitations (très faible concentration de précipitations sur les mois)
2	$11 < ICPM < 15$	Distribution modérée de précipitation (faible concentration de précipitations sur les mois)
3	$15 < ICPM < 20$	Distribution irrégulière de précipitations (forte concentration des précipitations sur quelques mois)
4	$ICPM > 20$	Distribution très irrégulière de précipitations (très forte concentration de précipitation sur quelques mois)

Récemment, plusieurs d'autres auteurs tels que Apaydin et al. (2006), Li et al. (2011), Luis et al. (2011), Adegun et al. (2012), Shi et al. (2013), Shi et al. (2015) et Petkovic et al. (2017) ont montré l'efficacité de l'ICPM pour détermination des zones climatiques dans une région. Ce sont ces travaux qui nous ont inspirés à utiliser l'ICPM pour partitionner notre région d'étude en zones climatiques. Avant de faire ces calculs, les lacunes journalières ont été tout simplement remplacées par zéro.

3.1.3 Variabilité intra-saisonnière : cycle saisonnier

La série des précipitations journalières est marquée par une alternance des jours secs et humides. Pour mieux appréhender la variabilité intra-saisonnière, on fait le lissage de la série des précipitations journalières, pour supprimer les fluctuations transitoires et faire apparaître les tendances à long terme. La série ainsi obtenue est une courbe lisse appelée cycle saisonnier. La moyenne mobile, définie par la formule ci-dessous, est généralement utilisée pour faire ce lissage.

$$Q_i = \left\{ \frac{1}{W} \sum_{j=0}^{W-1} P_{i+j-\frac{W}{2}}, i = \frac{W-1}{2}, \dots, N - \frac{W+1}{2} P_i, ailleurs \right. \quad (2.4)$$

P_i et Q_i sont respectivement les séries d'entrée et de sortie, toutes de taille N et w le nombre d'échantillons utilisés pour le calcul de la moyenne mobile. Cette fonction est codée sous le logiciel IDL sous le nom « SMOOTH ».

Plusieurs auteurs comme Lawin (2007) ont utilisé une moyenne mobile de 11 jours pour les pluies de la région de l'Afrique de l'ouest. Dans cette étude, nous avons fait un lissage progressif. On a calculé une moyenne mobile de 02 jours avec la série initiale (pluie journalière). Avec la première sortie, on a calculé une moyenne mobile de 03 jours. Avec la deuxième sortie, on a calculé une moyenne mobile de 4 jours. Nous avons ainsi augmenté progressivement le nombre de jours jusqu'à 10 jours pour obtenir la série finale. La série finale ainsi obtenue est plus lisse que la série issue d'une moyenne mobile simple de 11 jours. Avant de faire ces calculs, les lacunes journalières ont été tout simplement remplacées par zéro.

3.2 Indices des extrêmes de précipitations et de températures

3.2.1 Définitions des onze indices des extrêmes de précipitations

Ces indices sont définis à partir des cumuls journaliers de précipitations observées à une station, en une année.

TABLE 2.3 – Onze indices des extrêmes de précipitations

N°	ID	Appellation	Unité	Définition
1	RX1day	Cumul maximum de précipitations journalières	mm	Maximum du cumul journalier de précipitations sur une période (mois, saison, année)
2	RX5day	Cumul maximum de précipitations de 5 jours	mm	Maximum du cumul 5 jours de précipitations sur une période (mois, saison, année)
3	SDII	Intensité journalière de précipitation	mm / jour	Total des cumuls des jours pluvieux sur le nombre de jours pluvieux. Jours pluvieux ici correspondent aux jours où le cumul est supérieur ou égal 1mm
4	R10mm ou R10	Nombre de jours de précipitations d'au moins 10mm	Jours	Nombre de jours pluvieux ayant un cumul supérieur ou égal 10mm
5	R20mm ou R20	Nombre de jours de précipitations d'au moins 20mm	Jours	Nombre de jours pluvieux ayant un cumul supérieur ou égal 20mm
6	R25mm ou R25	Nombre de jours de précipitations d'au moins 25mm	Jours	Nombre de jours pluvieux ayant un cumul supérieur ou égal 25mm
7	CDD	Nombre de jours secs consécutifs	Jours	Nombre maximum de jours consécutifs ayant un cumul inférieur à 1mm
8	CWD	Nombre de jours pluvieux consécutifs	Jours	Nombre maximum de jours consécutifs ayant un cumul supérieur ou égal à 1mm
9	R95p	Occurrence de jours très pluvieux	%	Pourcentage de jours dont les cumuls sont supérieurs au 95e centile des cumuls journaliers
10	R99p	Occurrence de jours extrêmement pluvieux	%	Pourcentage de jours dont les cumuls sont supérieurs au 99e centile des cumuls journaliers
11	PRCPTOT	Cumul annuel	mm	Total de cumul de l'année, considérant uniquement les jours dont les cumuls sont supérieurs ou égal à 1mm

3.2.2 Définitions des 13 indices des extrêmes de températures

Ces indices sont définis à partir des températures maximales et minimales n journalières observées à une station, en une année. Les températures maximale et minimale sont encore appelées respectivement température diurne et température nocturne. Les températures maximale et minimale sont respectivement notées TX et TN.

TABLE 2.4 – Onze indices des extrêmes de température

N°	ID	Appellation	Unité	Définition
1	SU25	Nombre annuel de jours d'été	Jours	Nombre annuel de jours où la température TX > 25°C
2	TR20	Nombre annuel de nuits tropicales	Jours	Nombre annuel de nuits où la température TN > 20°C
3	TXx	Maximum des températures diurnes	°C	Maximum des températures TX, dans une période (mois, saison, année)
4	TNx	Maximum des températures nocturnes	°C	Maximum des températures TN, dans une période (mois, saison, année)
6	TXn	Minimum des températures diurnes	°C	Minimum des températures TX, dans une période (mois, saison, année)
6	TNn	Minimum des températures nocturnes	°C	Minimum des températures TN, dans une période (mois, saison, année)
7	TN10p ou TN10	Occurrence de nuits fraîches	%	Pourcentage de jours dont les températures minimales TN sont inférieures au 10e centile des TN
8	TX10p ou TX10	Occurrence de jours frais	%	Pourcentage de jours dont les températures maximales TX sont inférieures au 10e centile des TX
9	TN90p ou TN90	Occurrence de nuits chaudes	%	Pourcentage de jours dont les températures minimales TN sont supérieures au 90e centile des TN
10	TX90p ou TX90	Occurrence de jours chauds	%	Pourcentage de jours dont les températures maximales TX sont supérieures au 90e centile des TX
11	WSDI	Indicateur de durée des séquences chaudes	Jours	Nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où les températures diurnes sont supérieures au 90e centile des TX
12	CSDI	Indicateur de durée des séquences fraîches	Jours	Nombre annuel de nuits avec au moins 6 nuits consécutives où les températures nocturnes sont inférieures au 10e centile des TN
13	DTR	Amplitude thermique diurne	°C	Moyenne sur une période (mois, saison, année) de la différence entre TX et TN

3.3 Méthodes statistiques d'analyse des paramètres climatiques

3.3.1 Méthode non-paramétrique : test de significativité de tendance de Mann-Kendall

L'estimateur T_n d'un paramètre est d'autant plus robuste qu'est sa capacité à ne pas subir de changements lorsque les données ou les paramètres utilisés sont légèrement modifiés. Autrement dit, une estimation statistique comme un modèle ou un paramètre est dit robuste lorsqu'une modification ou introduction d'une ou plusieurs observations n'apporte aucun changement important. De ce point de vue, les tests non-paramétriques sont les plus robustes. Lorsqu'on fait l'hypothèse que les observations qui décrivent les individus sont tirées de distributions dépendant d'un nombre fini de paramètres, on parlera de tests paramétriques. Par opposition, lorsqu'on n'impose pas de distribution sur ces variables on sera dans le cadre de la statistique non-paramétrique. La validité des tests non-paramétriques ne dépendra pas de la distribution dont sont tirées les observations comme c'est le cas pour les tests paramétriques. De ce fait, ils seront donc naturellement plus robustes (Colletaz, 2017).

L'analyse des indices des extrêmes de précipitations et de températures programmée dans RclimDex, débute par une modélisation économétrique visant l'explication des variations de ces différents indices. Elle comprend la construction de modèle de régression linéaire simple expliquant les variations de chaque indice par le temps :

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon_t, \quad t = 1955, \dots, 2016; \quad (2.5)$$

Avec 0 et 1 les paramètres de régression, t l'erreur de spécification du modèle. Une fois les modèles établis, RclimDex teste l'existence d'une tendance par la méthode non-paramétrique de Mann-Kendall (Mann (1945), Kendall (1975), Hirsch (1982, 1984), Renard (2006)). C'est donc un test de significativité de tendance.

Soit la série :

$$Y_t = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (2.6)$$

On teste l'hypothèse nulle H_0 d'absence de tendance, puis on calcule la statistique S définie par :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}[(y_j - y_i)(x_j - x_i)] \quad (2.7)$$

où la fonction sgn est définie par : $\text{sgn}(x) \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x = 0 \\ -1, x < 0 \end{cases}$ Mann (1945) et Kendall (1975) ont

démontré que la variance de S est :

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2.8)$$

Dès que l'échantillon contient une dizaine de données, la loi de la statistique de test Z peut être approchée par une gaussienne centrée-réduite, (Croiset et Lopez (2013)).

$$Z = \frac{S-1}{(V(S))^{1/2}}, S > 0 \quad (2.9)$$

$$Z = 0, S = 0 \quad (2.10)$$

$$Z = \frac{S+1}{(V(S))^{1/2}}, S < 0 \quad (2.11)$$

traduisant les trois hypothèses alternatives de tendance positive, non nulle ou négative.

On utilise la variance corrigée :

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (2.12)$$

où t_i est le nombre d'égalités impliquant i valeurs.

A cette statistique Z, encore appelée τ de Mann-Kendall, est associée un paramètre permettant de tester la qualité d'ajustement d'un modèle : il s'agit du coefficient de détermination R^2 .

Le coefficient de détermination multiple est basé sur l'équation fondamentale d'analyse de la variance :

$$\sum_t (y_t - \bar{y})^2 = \sum_t (\hat{y}_t - \bar{y})^2 + \sum_t e_t^2 \quad (2.13)$$

Ainsi, la somme des carrés totaux équivaut à la somme des carrés expliqués et résiduels. Plus la variance expliquée est proche de la variance totale, meilleur est l'ajustement global du modèle.

On calcule le rapport :

$$R^2 = \frac{\sum_t (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_t (y_t - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_t e_t^2}{\sum_t (y_t - \bar{y})^2} \quad (2.14)$$

Par exemple, si $R^2 = 0,5$, on dit que 50% de la dispersion est expliquée par le modèle de régression. Plus la valeur du R^2 se rapproche des 100 %, mieux le modèle est ajusté. De façon précise et par rapport au contexte actuel, il s'agit du taux auquel la variable explicative (temps) explique les variations de l'indice ; donc le temps explique à 50% l'évolution des valeurs de l'indice.

3.3.2 Analyse multidimensionnelle des données

L'analyse multidimensionnelle des données est un ensemble de techniques permettant de ressortir les tendances globales d'un gros tableau de données. En effet, devant un gros tableau de données le statisticien on ne peut plus utiliser les méthodes de la statistique descriptive, puisqu'elles ne s'intéressent généralement qu'à l'étude d'au plus trois variables. Ainsi, lorsque l'on est face à un tableau comportant plusieurs variables, la statistique descriptive est remplacée par l'analyse multidimensionnelle des données, qui comporte entre autres l'ACP (Analyse en Composantes Principales), la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique), l'AFC (Analyse Factorielle de Correspondances), l'ACM (Analyse des Correspondance Multiples), etc. Dans cette étude, l'ACP et la CAH sont les méthodes d'analyse multidimensionnelle utilisées.

3.3.2.1 Analyse en composantes principales (ACP) L'ACP est une méthode qui permet de construire une variable ressemblant le plus possible à toutes les variables du tableau étudié. Cette variable est appelée variable de synthèse ou composante principale. La composante principale a alors la propriété d'être de corrélation maximum avec l'ensemble des variables du tableau. L'ACP fourni la dispersion des individus autour d'axes factoriels. La distance entre les individus, traduisant leur ressemblance, est mesurée quantitativement en généralisant le carré de la distance euclidienne que l'on définit entre deux points du plan. Chaque point M du plan est repéré par deux coordonnées x_M et y_M , et la distance au carré entre deux points M et M' est :

$$d^2(M, M') = (x_M - x_{M'})^2 + (y_M - y_{M'})^2 \quad (2.15)$$

3.3.2.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH) Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La CAH est l'une d'elles. Supposons que l'on dispose d'une population d'individus décrits par un paquet de variables quantitatives et ou qualitatives. Les méthodes de classification cherchent à partitionner l'ensemble des individus en des groupes homogènes. Les individus d'une même classe doivent se ressembler par rapport aux variables de l'analyse. Le nombre de classes à former, est a priori inconnu mais doit être relativement faible pour que la méthode puisse être considérée comme un résumé de l'information. Il peut cependant arriver que les données présentent des classes naturelles. Concrètement, on cherche à ce que les individus regroupés au sein d'une même classe soient le plus semblables possibles (homogénéité intra-classe) tandis que les classes soient le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classe). Le principe de la CAH est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distance, exprimant la distance entre les individus pris deux à deux. Ainsi, deux objets identiques auront une distance nulle. Plus les deux objets seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La

classification est ascendante car elle part des observations individuelles, elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée. La notion de ressemblance entre observations est évaluée par une distance entre individus. Plusieurs types de distances existent selon les données utilisées. Il existe de nombreuses distances mathématiques pour les variables quantitatives (distance euclidiennes, distance du Khi-deux, distance de Manhattan, etc.) Usuellement, pour un ensemble de variables qualitatives, on a souvent recours à la distance du khi-deux. Tout comme l'ACP, la CAH est implémenté sous le logiciel R.

4 Outils

Les logiciels Microsoft Word et latex ont été utilisés pour la rédaction ce mémoire. Les logiciels Microsoft Excel, R et IDL ont été utilisés pour le traitement des données de précipitations et de températures. Le logiciel QGIS a servi à la réalisation des cartes pour l'analyse spatiale. Le logiciel Microsoft Excel a servi d'interface d'échange de données entre les logiciels R et IDL. Les calculs de l'indice de Lamb, l'indice de concentration de précipitations mensuelles et le cycle saisonnier, ont été faits sous IDL. Les calculs des indices des extrêmes de températures et de précipitations et l'analyse de leur tendance ont été fait sous R avec le package RclimDex. La classification ascendante hiérarchique et l'analyse en composantes principales ont été aussi menées sous R. Description du package RclimDex RclimDex est un programme informatique initié par Zhang et Wang (2004) qui calcule 27 indices d'extrêmes de températures et de précipitations recommandés par l'ETCCDI (expert team on climate change detection indices), équipe d'experts sur la détection d'indices du changement climatique. Ce programme est exécutable sous le logiciel R. RclimDex reçoit à l'entrée les données journalières de précipitations, de températures (maximales et minimales) d'une station sur un certain nombre d'années, les coordonnées géographiques de la station, la valeur représentant les données manquantes, le maximum et le minimum plausibles de température dans la zone. Sur les 27 indices contenus dans le programme RclimDex, 03 sont relatifs au climat des zones polaires et tempérées car basés sur les jours de gel, de givrage et l'hiver. L'analyse des 24 autres peut être appliquée à tout type de climat, notamment à celui de la zone tropicale. Il s'agit de 13 indices de températures et de 11 indices de précipitations. Préalablement au calcul de ces indices, RclimDex effectue une vérification de la qualité des données suivant une procédure qui tient compte des statistiques des données manquantes et des valeurs non vraisemblables. Ainsi, il remplace toutes les valeurs manquantes (dans le cas de nos données codées par -99.9) par NA (Not Available) qui est le format interne de valeur manquante du logiciel R. Il remplace aussi par NA toutes les valeurs non vraisemblables, à savoir : les valeurs de précipitations journalières inférieures à zéro (donc différente de la valeur manquante) ; les valeurs de températures maximales supérieures au maximum plausible ; les valeurs températures minimales inférieures au minimum plausible. Une fois ces indices calculés, RclimDex

modélise individuellement leur variation en fonction des années, à travers un modèle de régression linéaire simple et teste l'existence d'une tendance au sein de chaque série par le test de significativité de tendance de Mann-Kendall. Après avoir testé, les hypothèses d'absence de tendance, de tendance nulle, négative ou positive, RclimDex fourni à la sortie un graphique spécifique affichant le chronogramme de la série de l'indice considéré et les résultats de l'analyse de tendance (statistique du test, le coefficient de détermination, l'erreur de la pente et la p-value).

RÉSULTATS ET ANALYSES

Dans ce chapitre, nous analysons les résultats concernant la variabilité des précipitations et des températures journalières au Bénin, de 1955 à 2016. Les données de pluies concernent 42 stations. Ces stations ont recueilli au moins 40 années de données sur les 62. Pour ce qui concerne la température, nous ne disposons que de données de 6 stations synoptiques. Ces stations disposent d'au moins 60 ans de données. Successivement, nous présentons la variabilité des précipitations, la variabilité des températures, les limites et la conclusion.

1 Variabilité des précipitations au Bénin, de 1955 à 2016

1.1 Variabilité de l'indice de concentration de précipitations mensuelles (ICPM) : découpage de la région d'étude en zones climatiques

Comme déjà évoqué dans le chapitre précédent, plusieurs d'autres auteurs ont montré l'efficacité de l'ICPM pour partitionnement d'une région en zones climatiques. A partir des cumuls journaliers, nous avons remplacé les lacunes par zéro avant de calculer les cumuls mensuels. L'ICPM est alors calculé pour chaque station pour toutes les années disponibles. La figure 3-1 présente le cas de quelques stations. On note que trois (03) types de distributions de l'ICPM pour tout le Bénin, quelle que soit l'année : la distribution modérée (compris entre 11 et 15) ; la distribution irrégulière (compris entre 15 et 20) ; ou la distribution très irrégulière (supérieur 20).

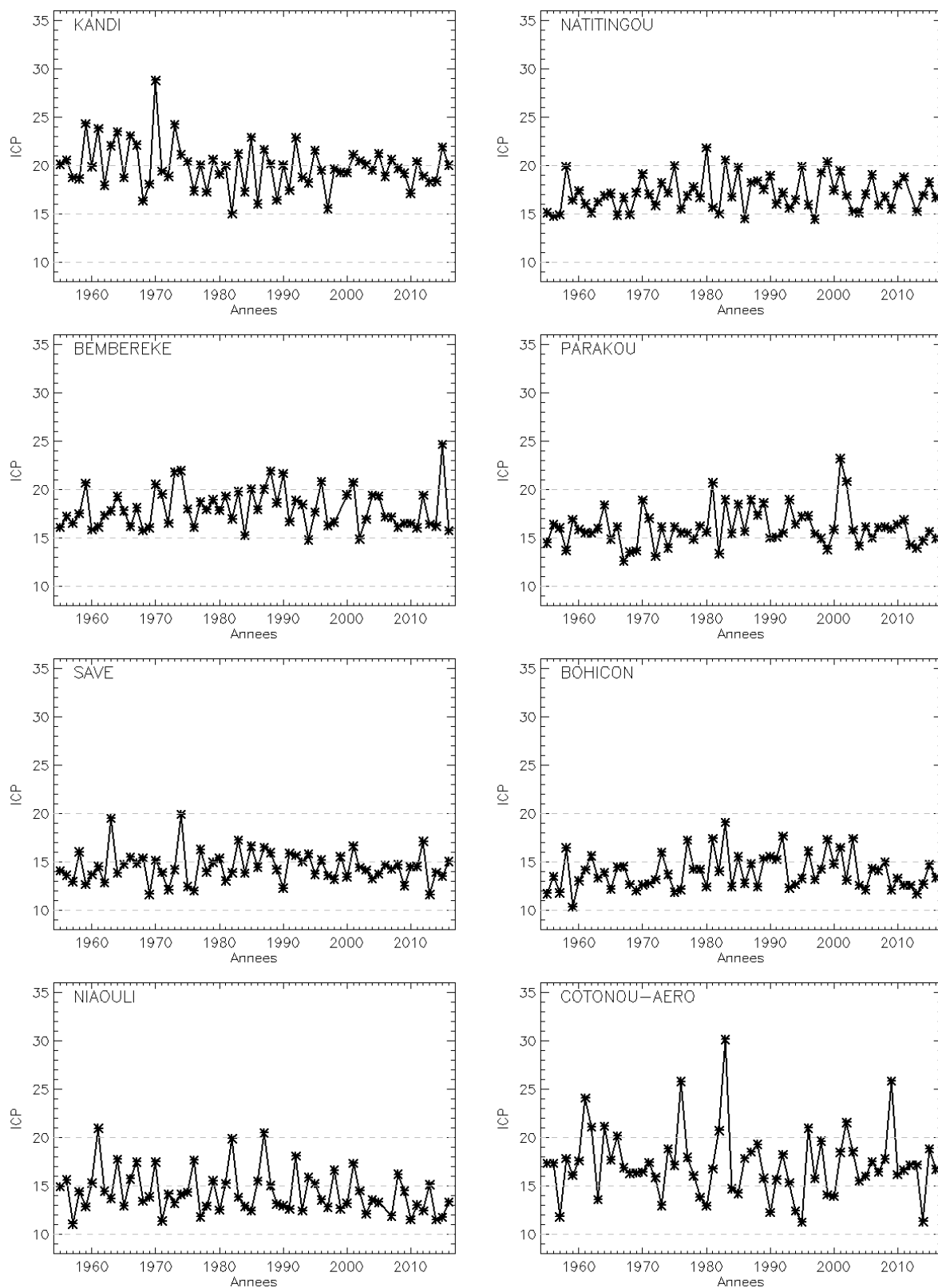


FIGURE 3.1 – Séries chronologiques de l'ICPM des huit stations représentatives des zones climatiques

L'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été appliquées aux données d'ICPM des 41 stations, débouchant ainsi sur une partition en quatre (04) classes comme le montre la carte ci-dessous (figure 3-2). Vu l'étendue des classes 2 et 3, nous

les avons subdivisés chacune en trois (03) sous-classes permettant ainsi la partition de notre région d'étude en huit (08) zones climatiques (Tableau 3-1)

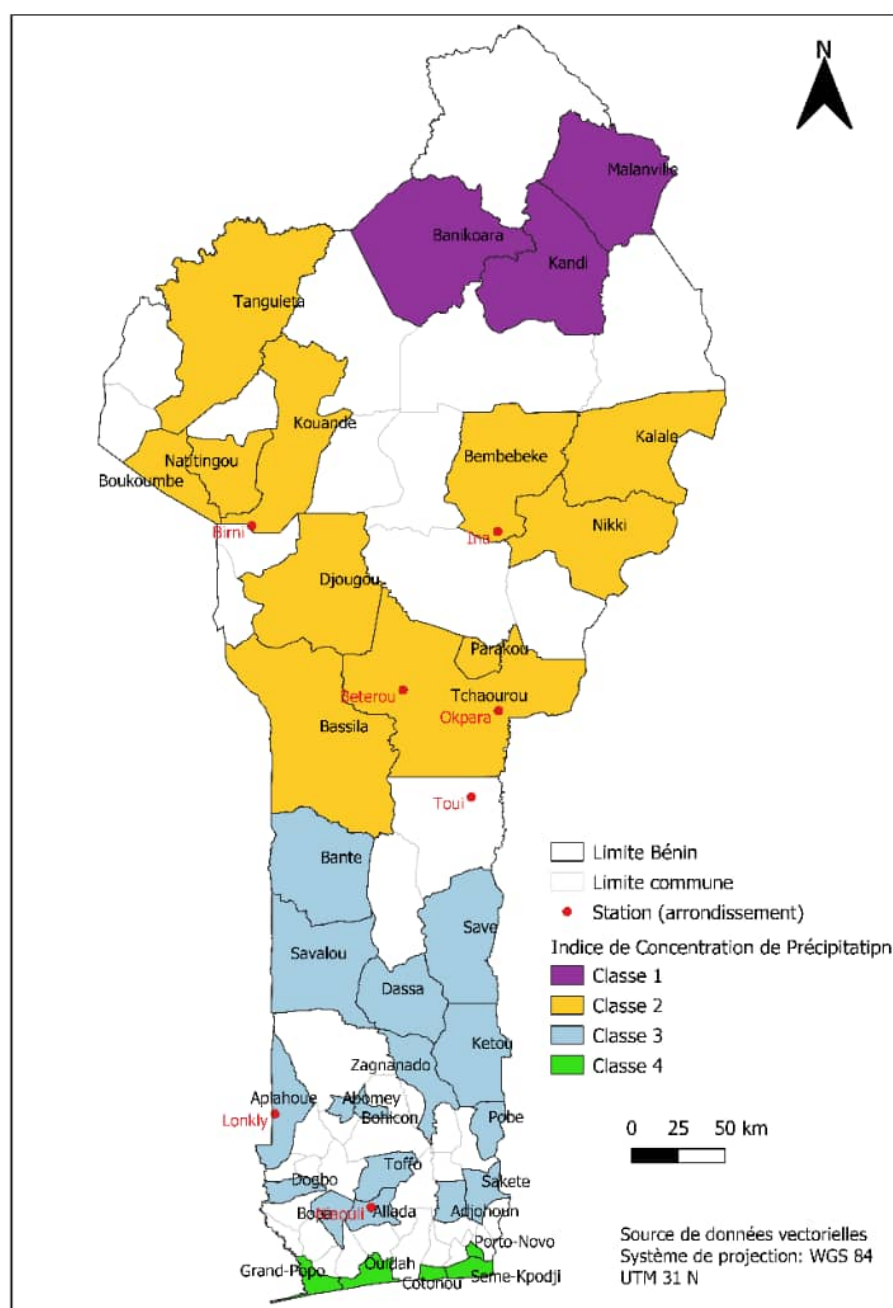


FIGURE 3.2 – Classification des stations selon l'ICPM

Il serait compliqué de faire une analyse comparative des variabilités pluviométriques entre les stations, le zonage nous permettra donc de simplifier cette analyse. Ainsi, nous avons choisi par zone climatique une station représentative (la station synoptique ou la station ayant moins d'années lacunaires). Ses stations sont affectées du symbole astérisque (*) dans le tableau ci-dessous.

TABLE 3.1 – Répartition des stations pluviométriques en zones climatiques

Classification des zones climatiques			Ttypes de distributions de l'ICPM		
Classes (ACP/CAH)	Zones climatiques	Station	Modérée	Irrégulière	Tr. irrégulière
Classe 1	Zone 1	Malanville	0	12,5	87,5
		Banikoara	0	44,26	55,73
		Kandi*	1,61	51,61	46,77
		Moyenne Zone 1	0,54	36,12	63,33
Classe 2	Zone 2	Tanguiéta	7,54	58,49	33,96
		Kouandé	6,89	84,48	8,62
		Natitingou*	9,83	85,24	4,91
		Boukoumbé	15	72,5	12,5
		Birni	4,54	84,09	11,36
		Djougou	9,8	84,31	5,88
		Moyenne Zone 2	8,93	78,19	12,87
	Zone 3	Bembèrèkè*	3,27	78,68	18,03
		Kalalé	1,88	79,24	18,86
		Nikki	2,04	87,75	12,24
		Ina	9,61	75	15,38
		Moyenne Zone 3	4,2	80,17	16,13
		Zone 4	Parakou*	29,03	66,12
	Tchaourou		36,95	54,34	8,69
	Bétérou		26,78	64,28	8,92
	Okpara		28,81	71,18	0
	Bassila		33,33	60	6,67
	Moyenne Zone 4		30,98	63,18	5,82

Classes (ACP/CAH)	Zones climatiques	Station	Modérée	Irrégulière	Tr. irrégulière	
Classe 3	Zone 5	Toui	52,54	44,06	3,38	
		Bantè	40,67	57,62	1,69	
		Savè*	67,74	32,25	0	
		Savalou	51,92	46,15	1,92	
		Dassa-Zoumey	72,72	23,63	3,63	
		Moyenne Zone 5	57,12	40,74	2,12	
	Zone 6	Kétou	65,57	32,78	1,63	
		Zagnanado	67,85	28,57	3,57	
		Aplahoué	72,13	27,86	0	
		Bohicon*	74,19	25,8	0	
		Abomey	76,67	23,33	0	
		Pobè	80	20	0	
		Lonkly	71,18	28,81	0	
		Toffo	70,58	29,41	0	
		Dogbo-Tota	68,42	31,57	0	
		Sakété	75,4	24,59	0	
		Moyenne Zone 6	72,2	27,27	0,52	
		Zone 7	Adjohoun	60,65	37,7	1,63
			Bopa	50,81	42,62	6,55
	Niaouli*		65,57	31,14	3,27	
Moyenne Zone 7	57,89		38,66	3,43		
Classe 4	Zone 8	Porto-Novo	35,59	49,15	15,25	
		Semè-Kpodji	37,25	43,13	19,6	
		Grand-Popo	20,68	44,82	34,48	
		Cotonou-Ville	18,18	67,27	14,54	
		Cotonou-Aéroport*	20,97	62,9	16,13	
		Ouidah	12,28	61,4	26,31	
		Moyenne Zone 8	24,16	54,78	21,05	
		Moyenne Bénin	32	52,37	15,66	

1.2 Variabilité du cumul interannuel

L'indice de Lamb appliqué aux cumuls annuels est encore appelé indice d'anomalie du cumul annuel de précipitations. Il permet d'apprécier la variabilité interannuelle de la pluviométrie à une station donnée. Il a été calculé pour les 41 stations étudiées au Bénin, sur la période 1955-2016. La figure ??? décrit l'indice des huit stations de références des huit zones climatiques définies. De 1955 à 1970, l'indice est en majorité positif sur les huit zones climatiques. Ces années sont donc en majorité humide. Cette période est succédée, sur toutes les zones, par deux décennies (de 1970 à 1990) de sécheresse où l'indice est en majorité négatif. A partir de 1990, on assiste à une alternance d'années humides et sèches.

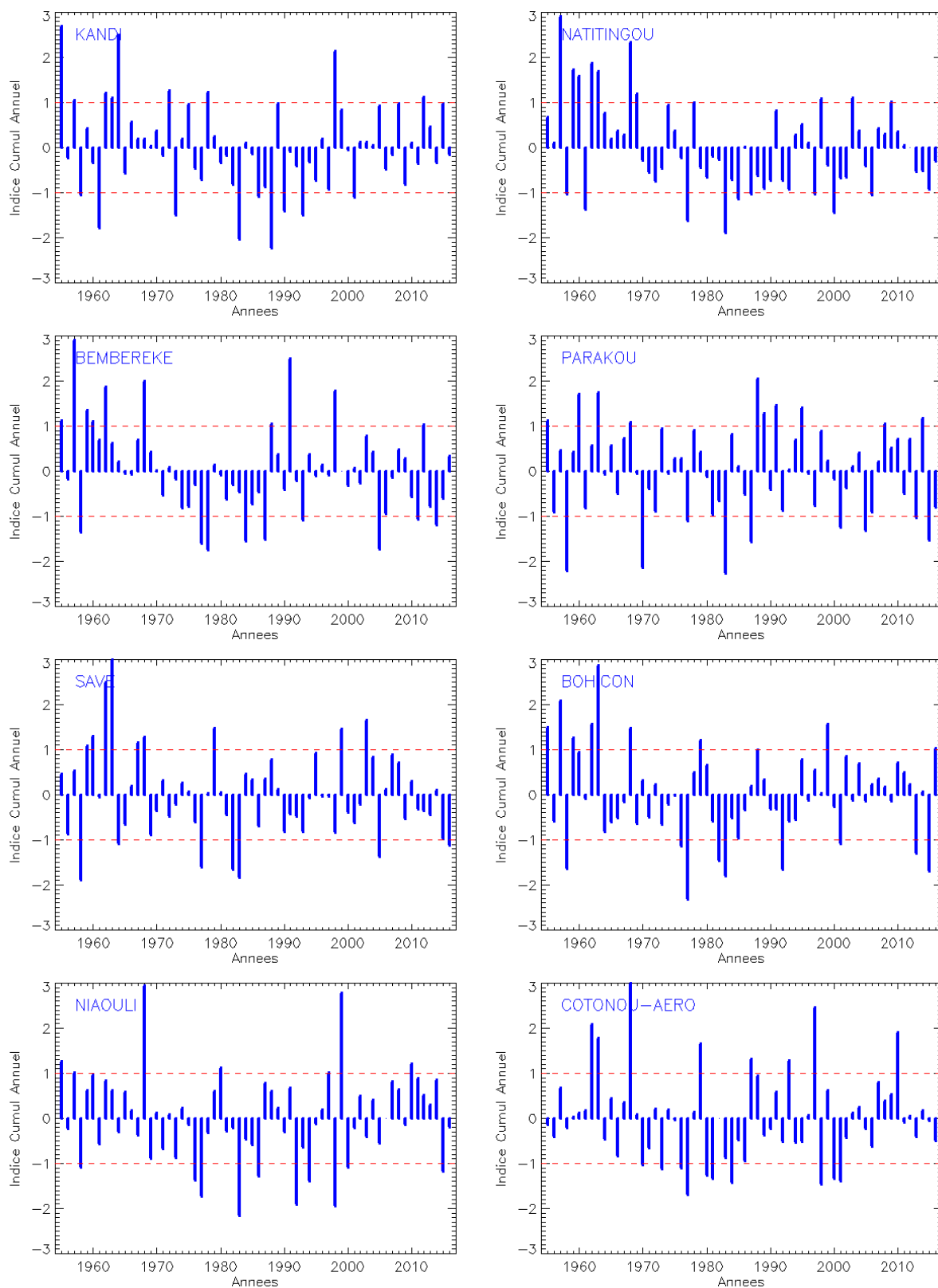


FIGURE 3.3 – Indice de l’anomalie des cumuls de précipitations interannuelle des stations représentatives des huit zones climatiques

Nous avons fait dans le tableau 3-2 le bilan des types d’années observées par zone climatique. On note sur les huit zones climatique que les années anormales (déficitaires et excédentaires) sont

d'environ 30 % et en proportion presque égale. Il n'existe donc pas de variabilité spatiale en termes d'occurrences d'années déficitaires ou excédentaires.

TABLE 3.2 – Pourcentage des différents types d'années de pluviométrie

Zones climatiques	Déficitaires	Excédentaires	Normales
Zone 1 (Kandi 62 années)	14,52	14,52	70,97
Zone 2 (Natitingou 61 années)	14,75	18,03	67,21
Zone 3 (Bembereke 61 années)	14,75	16,39	68,85
Zone 4 (Parakou 62 années)	14,52	16,13	69,35
Zone 5 (Savè 62 années)	11,29	14,52	74,19
Zone 6 (Bohicon 62 années)	14,52	16,13	69,35
Zone 7 (Niaouli 61 années)	16,39	11,47	72,13
Zone 3 (Cotonou-A 62 années)	16,13	12,9	70,97
Moyenne (Bénin)	14,61	15,01	70,38

1.3 Variabilité intra-saisonnière : cycle saisonnier

La variabilité intra-saisonnière est analysée au moyen du cycle saisonnier. Le cycle saisonnier est calculé chaque année pour chaque station. Pour comprendre l'impact de la variabilité du cumul interannuelle sur le cycle saisonnier, nous avons calculé cycle moyen par type d'année (normale, excédentaire et déficitaire) pour chaque station. Le résultat des stations de référence des huit zones climatiques, est présenté sur les figures 3-4, 3-5 et 3-6.

Les zones 1, 2, 3 et 4 sont caractérisées par une saison des pluies avec démarrage très lent autour de mi-avril et une fin brutale vers la fin du mois d'octobre. La pente de démarrage dans la zone 1 est plus forte que celle des zones 2, 3 et 4 alors que la pente de la zone 4 est plus faible que celle des zones 2 et 3. Les zones 5, 6, 7 et 8 sont caractérisées par deux saisons pluvieuses. La première saison démarre lentement aux environs de début mars et prend fin vers mi-juillet. La deuxième saison démarre aux environs de début septembre et prend fin vers fin novembre. La démarcation entre les deux saisons est plus marquée dans les zones 7 et 8 que dans les zones 5 et 6. Le pique de la première saison est plus prononcé dans la zone 8 que dans la zone 7 alors qu'au cours de la deuxième saison c'est le pique de la zone 7 qui est plus prononcé que celui de la zone 8.

Dans les zones 1, 2, 3 et 4, le cycle des années excédentaires se différencie de celui des années normales par un pique plus élevé et une fin moins brutale. Dans les zones 5, 6, 7 et 8, le cycle des années excédentaires se différencie de celui des années normales par une disparition quasi-totale du temps de transition entre les deux saisons.

Dans les zones 1, 2, 3 et 4, les années déficitaires sont marquées par un démarrage tardif, une fin précoce et un pique abaissé comparativement aux années normales. Dans les zones 5, 6, 7 et 8, les années déficitaires sont marquées par un temps de transition plus long, une fin précoce et les pics abaissés comparativement aux années normales.

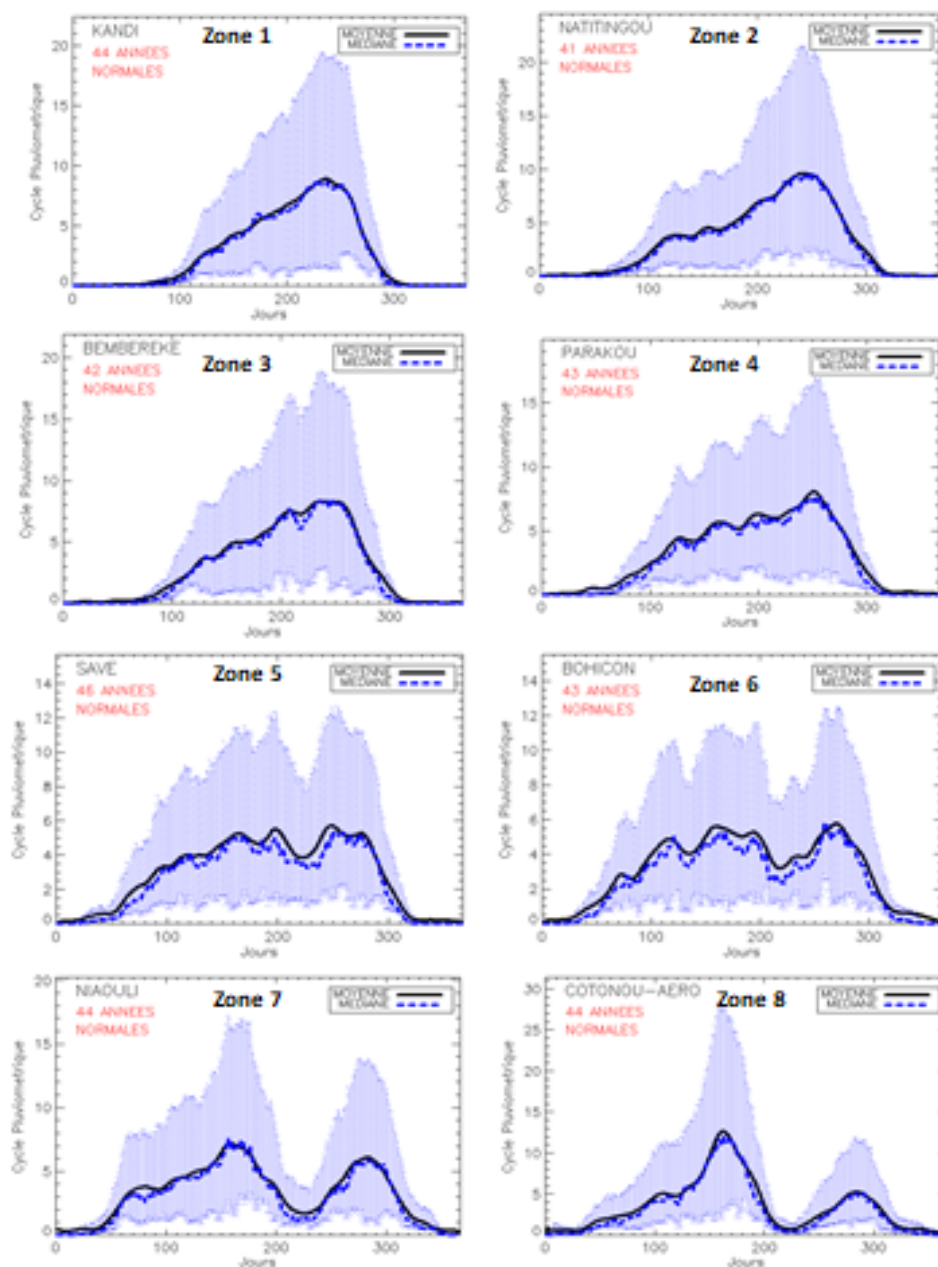


FIGURE 3.4 – Cycles saisonniers moyens des années normales

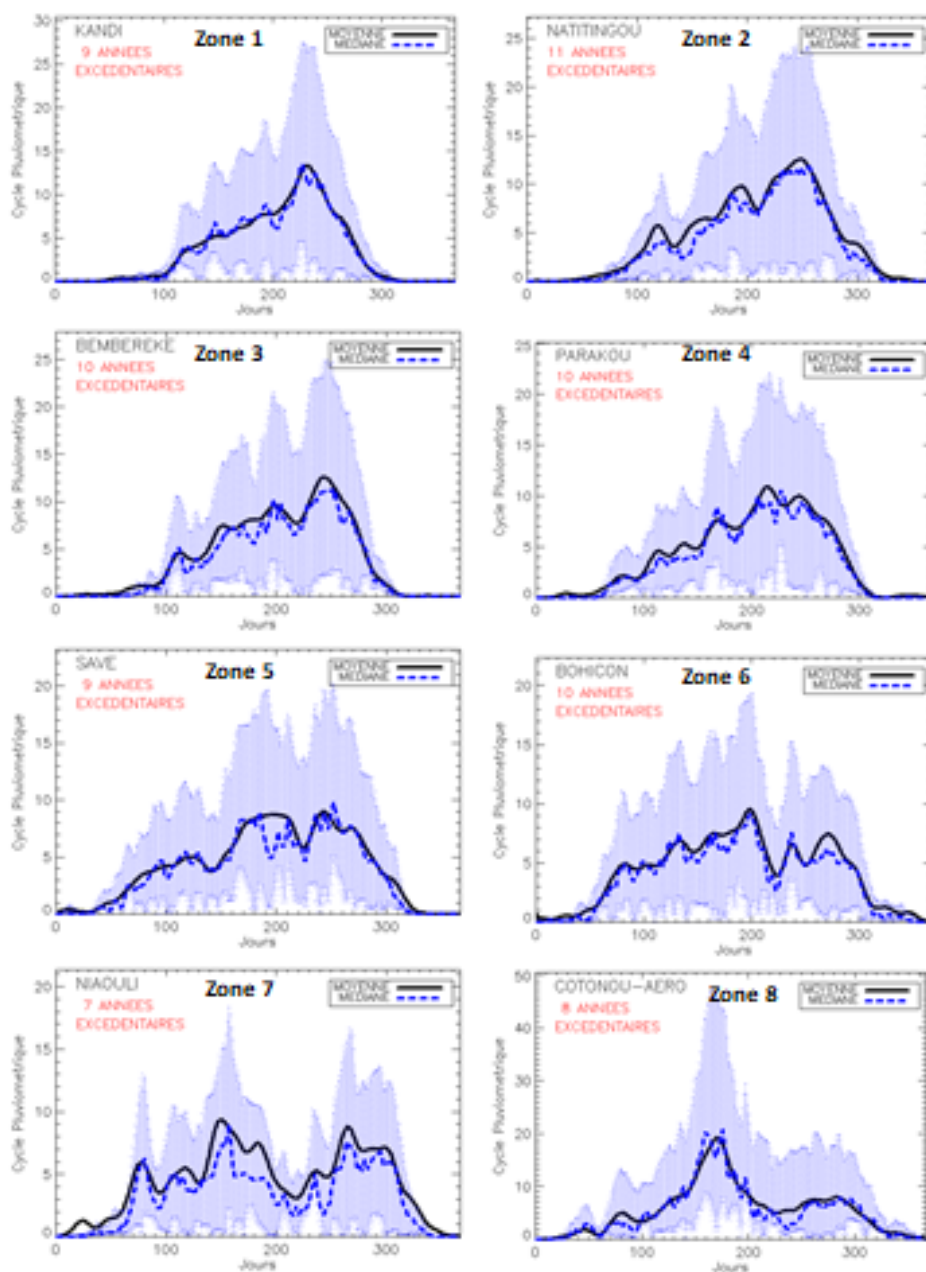


FIGURE 3.5 – Cycles saisonniers moyens des années excédentaires

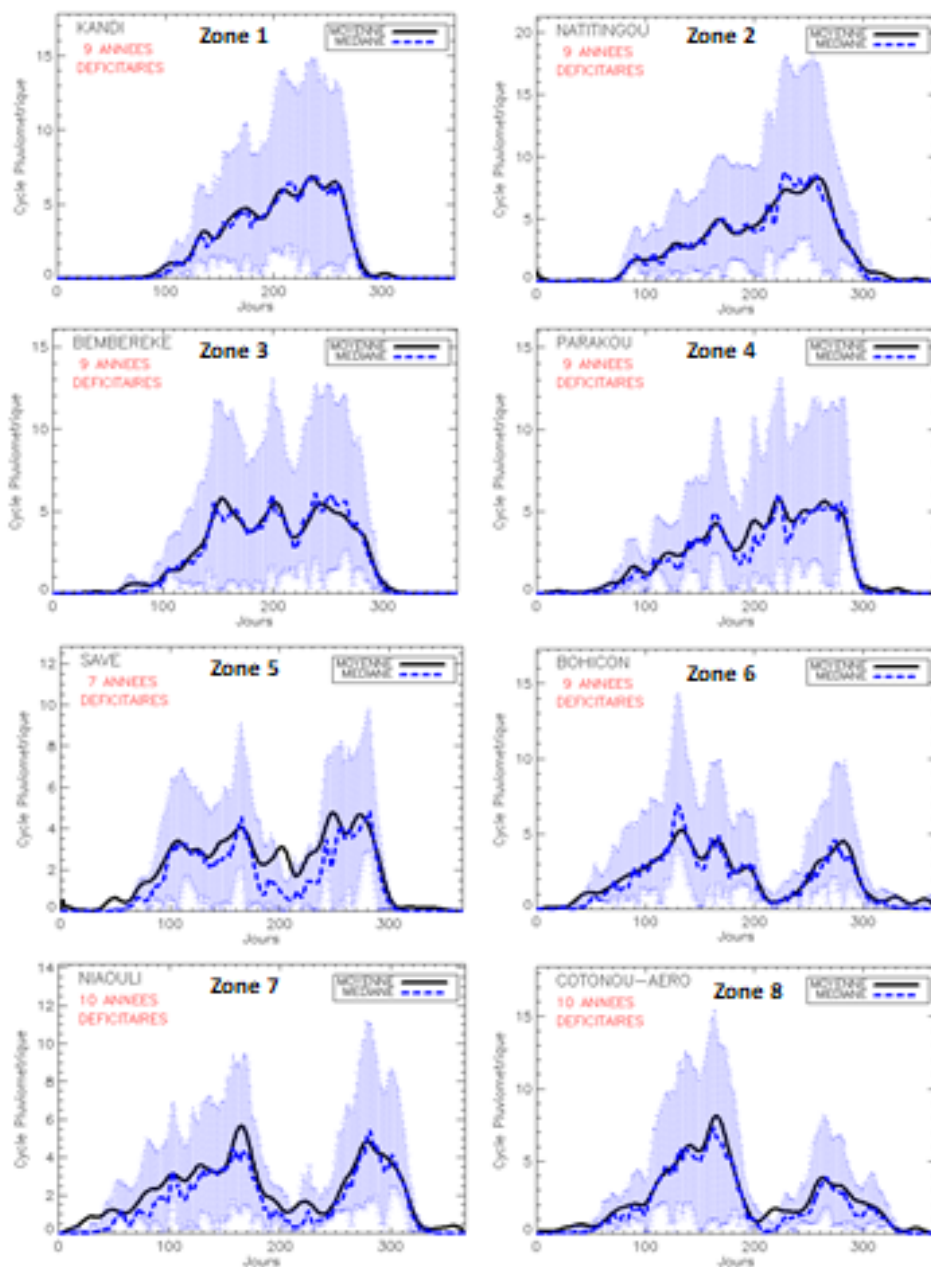


FIGURE 3.6 – Cycles saisonniers moyens des années déficitaires

1.4 Tendance des indices des extrêmes de précipitations

Nous avons analysé les tendances des indices à partir des valeurs de la pente et de la p-value estimées par la méthode de Mann-Kendall. En statistique, la p-value-p est considérée comme une mesure du seuil à partir duquel les données plaident contre l'hypothèse nulle. Si la p-value est inférieure au seuil traditionnellement utilisé (5 %), on rejette l'hypothèse nulle en faveur de l'hypothèse alternative, et le résultat du test est déclaré « statistiquement significatif ». D'autres seuils sont généralement admis avec les appréciations indiquées dans le tableau ci-dessous :

TABLE 3.3 – Niveaux de significativité des coefficients de Mann-Kendall

Identifiant	Intervalle de la p-value	Appréciation
***	$p \leq 0.01$	Très forte présomption contre l'hypothèse nulle
**	$0.01 < p \leq 0.05$	Forte présomption contre l'hypothèse nulle
*	$0.05 < p \leq 0.1$	Faible présomption contre l'hypothèse nulle
	$p > 0.1$	Pas de présomption contre l'hypothèse nulle

Dans cette étude, la figure 3-7 présente les sorties du RclimDex de l'indice PRCPTOT (cumul total annuel) pour les huit stations représentatives des zones climatiques identifiées. Les figures des autres indices pour ces huit stations se trouvent en annexes.

Le pourcentage de significativité et de signe des tendances des indices des extrêmes de précipitations pour les stations 42 sur la période 1955-2016 de la région d'étude est présenté dans le tableau 3-4 et indique qu'aucun indice n'a de tendance majoritairement significative sur la région d'étude.

La synthèse des sorties du RclimDex des onze indices des extrêmes de précipitations, pour les huit stations représentatives des zones climatiques, pour la période 1955 à 2016, est présentée dans le tableau 3-5. L'analyse de ces résultats est présentée dans le tableau 3-6.

TABLE 3.4 – Pourcentage significativité et de signe des tendances des indices des extrêmes de précipitations pour les stations 42 sur la période 1955-2016

Indices	Significativité des tendances MK				Signes	
	(***)	(**)	(*)	Pas Significative	Positif	Négatif
RX1day	2	7	7	84	50	50
RX5day	2	10	2	86	24	76
SDII	10	10	10	70	67	33
R10mm	7	17	7	69	13	87
R20mm	0	10	10	80	35	65
R25mm	0	5	14	81	41	59
CDD	10	5	7	78	76	24
CWD	5	20	14	59	13	87
R95p	2	7	2	89	26	74
R99p	5	7	5	83	37	63
PRCPTOT	5	7	10	78	5	95

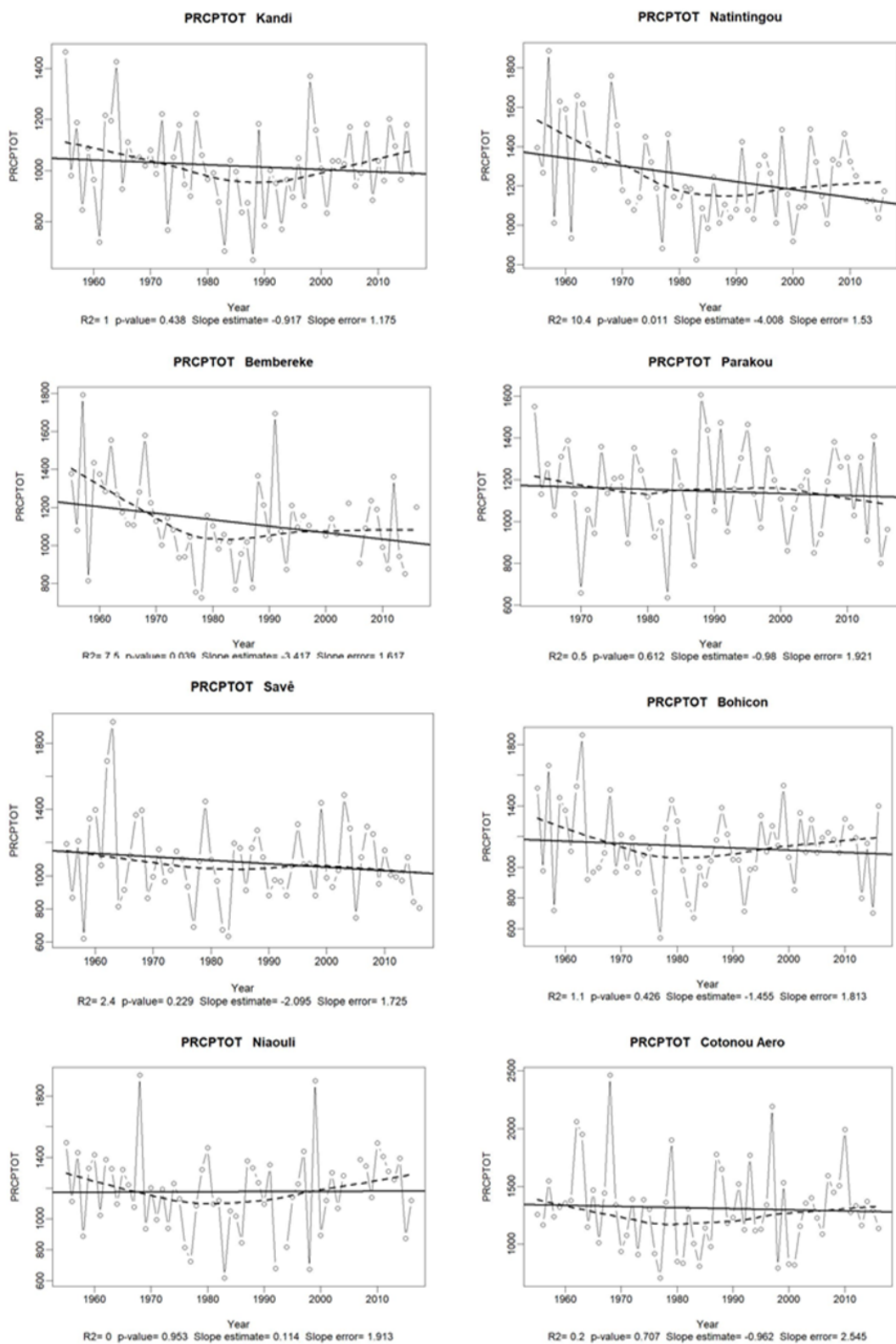


FIGURE 3.7 – Sortie RClmDex, indice de cumul de précipitation annuelle (PRCPTOT), des stations représentant les huit zones climatiques

TABLE 3.5 – : La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1955 à 2016.

Indices	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8
RX1day	0.102	-0.256*	-0.202	0.125	-0.155	0.164	0.211	-0.195
RX5day	-0.438	-0.411**	-0.495**	-0.003	-0.406	0.098	-0.152	-0.596
SDII	0.025*	-0.007	-0.010	-0.006	0.017	0.034**	0.014	0.007
R10mm	-0.032	-0.116**	-0.116**	-0.026	-0.029	-0.059	0.014	-0.037
R20mm	-0.023	-0.058	-0.073**	-0.013	0.001	-0.034	-0.006	-0.029
R25mm	-0.018	-0.057*	-0.054*	-0.041	0.010	-0.006	-0.025	-0.043
CDD	0.378*	0.195	0.250	0.253	0.171	0.367*	-0.098	0.131
CWD	-0.021	-0.035*	-0.024**	-0.030**	-0.016	-0.024**	-0.001	-0.034**
R95p	0.748	-1.982**	-1.189	-0.587	-2.165*	0.788	-0.427	0.633
R99p	-0.030	-1.128*	-0.585	0.293	-0.407	0.111	0.332	0.080
PRCPTOT	-0.917	-4.008**	-3.417**	-0.980	-2.095	-1.455	0.114	-0.962

TABLE 3.6 – Analyse des résultats du RclimDex des onze indices d’extrêmes de précipitations des huit zones climatiques au Bénin, de 1955 à 2016

N°	Indice	Résultat et analyse	Synthèse
1	Cumul maximum de précipitations journalières (RX1day)	Le Cumul maximum de précipitations journalières ne présente aucune tendance significative par station. Spatialement les tendances sont divergentes dans toute la région.	Tendances spatiales divergentes dans toute la région.
2	Cumul maximum de précipitations de 5 jours (RX5day)	Cumul maximum de précipitations de 5 jours est décroissant sur toutes les zones sauf à Bohicon. Cette tendance n’est significative que pour deux stations.	Sa tendance est décroissante sur le Bénin, mais elle n’est pas significative.
3	Intensité de précipitation journalière (SDII)	Intensité de précipitation journalière est décroissante dans tout le Nord sauf en zone 1 (Kandi) et croissante au Centre et au Sud. La tendance n’est significative qu’à Bohicon.	Sa tendance n’est pas significative sur le Bénin. Elle décroissante au Nord (Zone 1, 2, 3 et 4), croissante au Sud et au Centre (Zone 5, 6, 7,8).
4	Nombre de jours de précipitations d’au moins 10mm (R10mm ou R10)	Nombre de jours de précipitations de cumul supérieur à 10mm est en diminution sur toute la région sauf dans la zone 7 (Niaouli). Néanmoins, cette tendance n’est significative que dans deux zones (zone 2 et 3).	Sa tendance n’est pas significative sur le Bénin. Elle est décroissante sur la région.
5	Nombre de jours de précipitations d’au moins 20mm (R20mm ou R20)	Nombre de jours de précipitations de cumul supérieur à 20mm est en diminution sur toute la région sauf dans la zone 5 (Savè). Néanmoins, cette tendance n’est significative que dans la zone 3.	Sa tendance n’est pas significative sur le Bénin. Elle est décroissante sur la région.

N°	Indice	Résultat et analyse	Synthèse
6	Nombre de jours de précipitations d'au moins 25mm (R25mm ou R25)	Nombre de jours de précipitations de cumul supérieur à 25mm est en diminution sur toute la région sauf dans la zone 5 (Savè). Cette tendance n'est significative nulle part.	Sa tendance n'est pas significative sur le Bénin. Elle est décroissante sur la région.
7	Nombre de jours secs consécutifs (CDD)	Nombre de jours secs consécutifs est croissant dans toute la région sauf en zone 7 (Niaouli). Cette tendance n'est significative qu'à Bohicon.	Cet indice est croissant, mais la tendance n'est pas significative.
8	Nombre de jours pluvieux consécutifs (CWD)	Nombre de jours pluvieux consécutifs est décroissant dans toute la région. Cette tendance est significative dans quatre zones (3, 4, 6 et 8) sur les huit.	Cet indice est décroissant, mais la tendance n'est pas significative.
9	Occurrence de jours très pluvieux (R95)	L'occurrence de jours très pluvieux à une tendance spatiale divergente. Les tendances ne sont significatives que pour deux stations.	Sa tendance n'est pas significative sur le Bénin. Elle décroissante au Nord (Zone 1, 2, 3 et 4), croissante au Sud et au Centre (Zone 5, 6, 7,8).
10	Occurrence de jours extrêmement pluvieux (R99)	L'occurrence de jours extrêmement pluvieux est décroissant au Nord sauf en zone 4 (Parakou) et croissant au Centre et au Sud sauf à Savè. Cette tendance n'est significative nulle part.	Sa tendance n'est pas significative sur le Bénin. Elle décroissante au Nord (Zone 1, 2, 3 et 4), croissante au Centre et au Sud (Zone 5, 6, 7,8).
11	Cumul annuel (PRCPTOT)	La tendance du cumul annuel est significative que pour deux zones (zone 2 et 3). Le cumul annuel est décroissant sur toute la région sauf en zone 7.	Sa tendance n'est pas significative sur le Bénin. Elle décroissante sur toute la région.

En résumé, aucun des onze indices d'extrêmes de précipitations n'a de tendance significative sur les huit zones simultanément. Le CWD (Nombre de jours pluvieux consécutifs) a manifesté le plus grand nombre de tendances significatives, soit quatre zones sur les huit. Par ailleurs, les tendances sont divergentes entre les zones pour tous les indices sauf le CWD qui indique une diminution maximale de 0,35jour/décennie ce qui est très insignifiant.

Ces résultats nous ont obligé à subdiviser la période d'étude en deux tout en respectant les exigences de l'Organisation Mondiale de la Météorologie de trente années minimales pour l'étude des tendances des variables climatiques. Ainsi, nous avons choisi les périodes de 1955-1985 (31 ans) et 1986-2016 (31 ans) pour analyser à nouveau les tendances de ces indices. La synthèse des sorties du RclimDex des onze indices des extrêmes de précipitations, pour les huit stations représentatives des zones climatiques, pour les périodes 1955 à 1985 et 1986 à 2016, sont respectivement présentés dans les tableau 3-7 et tableau 3-8. Les résultats montrent que de 1955 à 1985, le cumul annuel (PRCPTOT) a diminué simultanément sur les huit zones et de manière significative sur six zones. Cette diminution est comprise entre 45,94mm/décennie et 152,85mm/décennie. De même, sur la même période, note augmentation du Nombre de jours secs consécutifs (CDD). Cette augmentation est significative dans le Nord (zone 1, 2, 3 et 4) et est comprise entre 12,53jours/décennie et 17,82jours/décennie. Dans le sécheresse démarrée 1970 dans toute la région d'étude s'est perpétuée jusqu'en 1985.

Les résultats de 1986 à 2016 indiquent une absence quasi-totale de tendance significative pour tous les indices et sur toutes les zones. Les tendances sont aussi divergentes entre les zones. Le cumul annuel (PRCPTOT) a aussi une tendance divergente entre les zones et plus surprenant, il augmente de manière significative dans la zone 1 (Kandi) de 68,74mm/décennie comme si cette zone tend à retrouver situation pluviométrique d'avant 1970. Nombre de jours secs consécutifs (CDD) a aussi une tendance divergente au Nord, alors qu'il augmentait de manière significative de 1955 à 1985.

TABLE 3.7 – La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1955 à 1985

Indices	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8
RX1day	-0.272	-1.089**	-0.787**	0.285	-0.552	-0.657*	-0.589	-0.41
RX5day	-1.668*	-1.242**	-1.924**	-0.795	-0.763	-0.768	-0.818	-1.802
SDII	0.047	-0.031	0.000	-0.074	0.015	-0.034	-0.053	-0.059
R10mm	-0.071	-0.429***	-0.488***	-0.175	-0.106	-0.302*	-0.233	-0.439**
R20mm	-0.075	-0.227*	-0.153	-0.119	-0.039	-0.315**	-0.176	-0.298**
R25mm	-0.073	-0.175*	-0.204**	-0.044	-0.068	-0.197*	-0.162*	-0.303***
CDD	1.253**	1.442**	1.782***	1.737***	0.852	0.839*	0.042	0.539
CWD	-0.044	-0.075	-0.087***	0.017	-0.020	-0.034	-0.023	-0.054
R95p	-1.686	-6.556**	-5.677***	-1.002	-6.144	-5.756*	-6.261**	-0.636
R99p	-1.799	-3.181	-2.363*	-0.702	-1.439	-2.241	-3.316**	-1.378
PRCPTOT	-5.974*	-15.285***	-16.506***	-4.594	-7.897	-14.582**	-10.587**	-15.204**

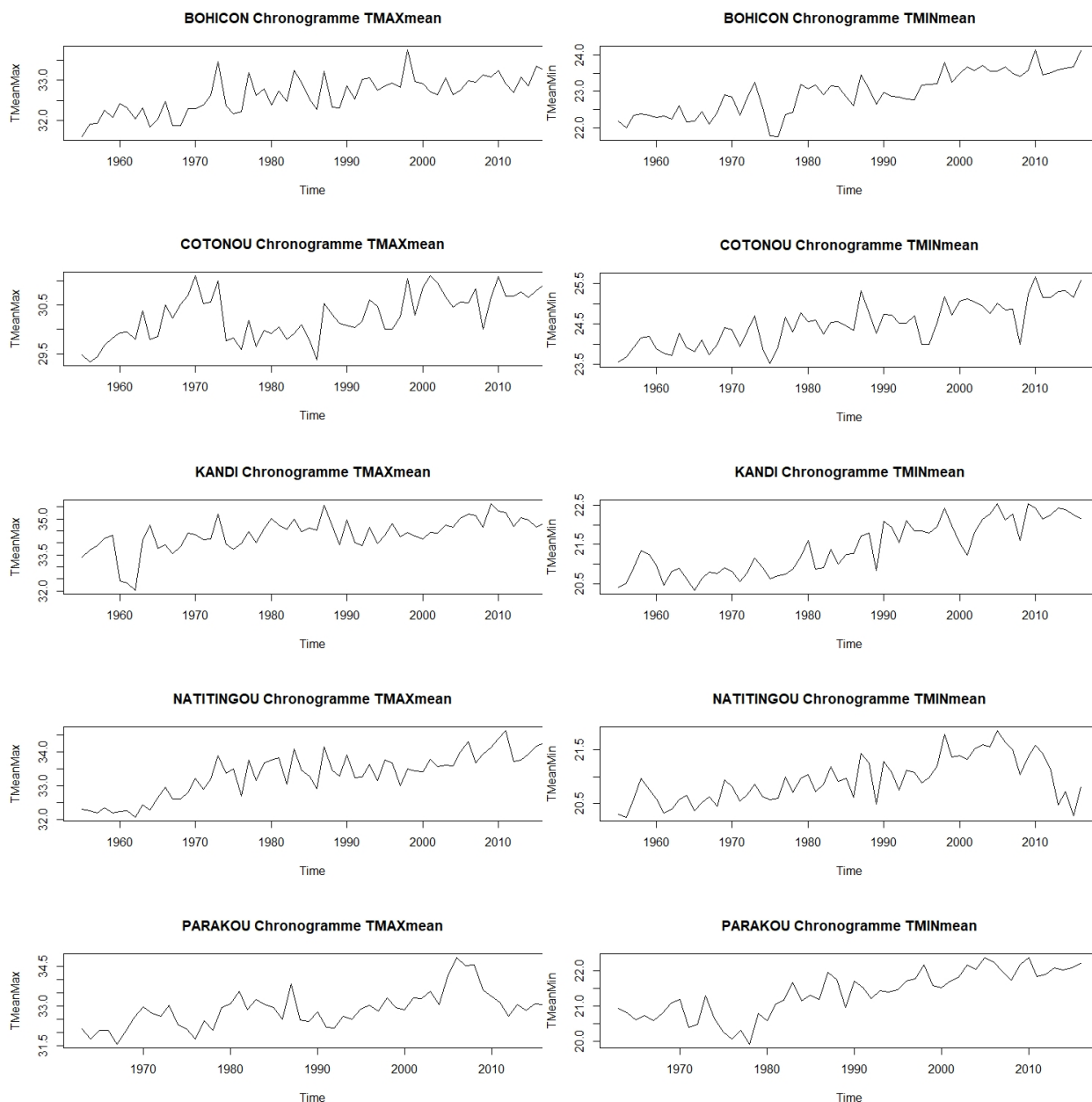
TABLE 3.8 – La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des onze indices des extrêmes de précipitations des huit zones climatiques, de 1986 à 2016

Indices	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8
RX1day	0.241	0.504*	-0.416	-1.207*	0.032	0.263	-0.396	-0.573
RX5day	0.533	0.536	-1.110*	-1.588*	-0.273	0.181	-1.629	-0.312
SDII	0.046	0.016	-0.073	-0.028	-0.022	0.048	0.011	-0.075
R10mm	0.212**	0.000	-0.107	-0.036	-0.009	0.001	0.224	0.059
R20mm	0.127	0.064	-0.074	-0.076	-0.062	0.055	0.156	0.026
R25mm	0.092	0.009	-0.026	-0.029	-0.027	0.027	0.064	-0.019
CDD	-0.035	-0.649	0.204	0.154	0.662	0.111	-0.402	-0.165
CWD	0.050	0.066	-0.056*	-0.037	-0.085**	-0.049	0.013	-0.010
R95p	2.380	0.379	-1.818	-3.378	-1.507	0.803	-0.343	-4.996
R99p	-0.058	1.844	-1.031	-4.155**	-0.004	-0.232	-0.368	-2.762
PRCPTOT	6.874**	2.246	-2.732	-4.121	-1.892	0.384	5.261	-0.857

2 Variabilité des températures au Bénin, de 1955 à 2016

2.1 Climatologie des moyennes mensuelles de températures

Nous avons calculé les moyennes mensuelles de températures maximales et minimales dans le but d'analyser la variabilité spatio-temporelle des cycle annuels de températures dans la région d'étude. La figure 3-8 présente ces cycles pour les six stations synoptiques.



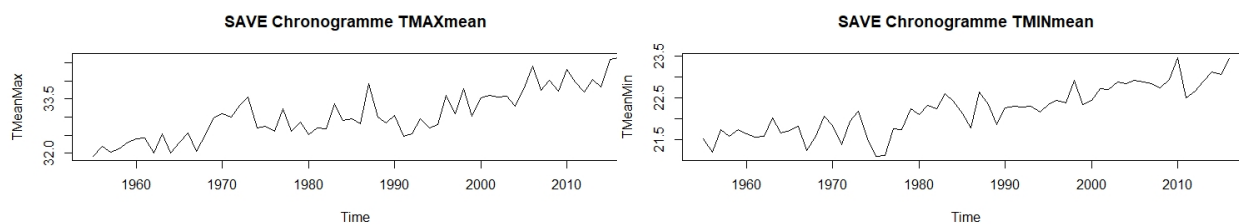


FIGURE 3.8 – Chronogrammes des moyennes annuelles de températures des six stations synoptiques

La moyenne de la température maximale est minimale, sur toute la région d'étude, dans les mois de juillet, août et septembre qui coïncide avec le cœur de la saison des pluies au Nord et la deuxième (la petite) saison des pluies au Centre et au Sud. Elle est maximale, sur toute la région d'étude, dans les mois de février, mars et avril. La fin de cette période chaude correspond au démarrage de la saison des pluies au Nord et son milieu correspond avec le début de la première (la grande) saison des pluies au Centre et au Sud. La moyenne de la température minimale est minimale, au Nord et au Centre, dans les mois de novembre, décembre et janvier qui correspond à la période de l'harmattan (vent d'est, sec, qui soufflent en hier sur l'Afrique de l'Ouest en provenance du Sahara). Cette période ce manifeste également par de fortes températures maximales, mais moindre que celles de la période de février-mars-avril. Au Sud, la température minimale est minimale en janvier (effet de l'harmattan) et en juillet-août-septembre (effet de la petite saison de pluie). Elle est maximale, sur toute la région, en mars-avril correspondant à la période des fortes valeurs de la température maximale.

2.2 Tendances des moyennes annuelles de températures

Les moyennes annuelles des températures maximale et minimale ont été calculées sur les six stations synoptiques (figure 3-9). Leurs tendances ont été analysées avec la méthode de Mann-Kendall. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 3-9.

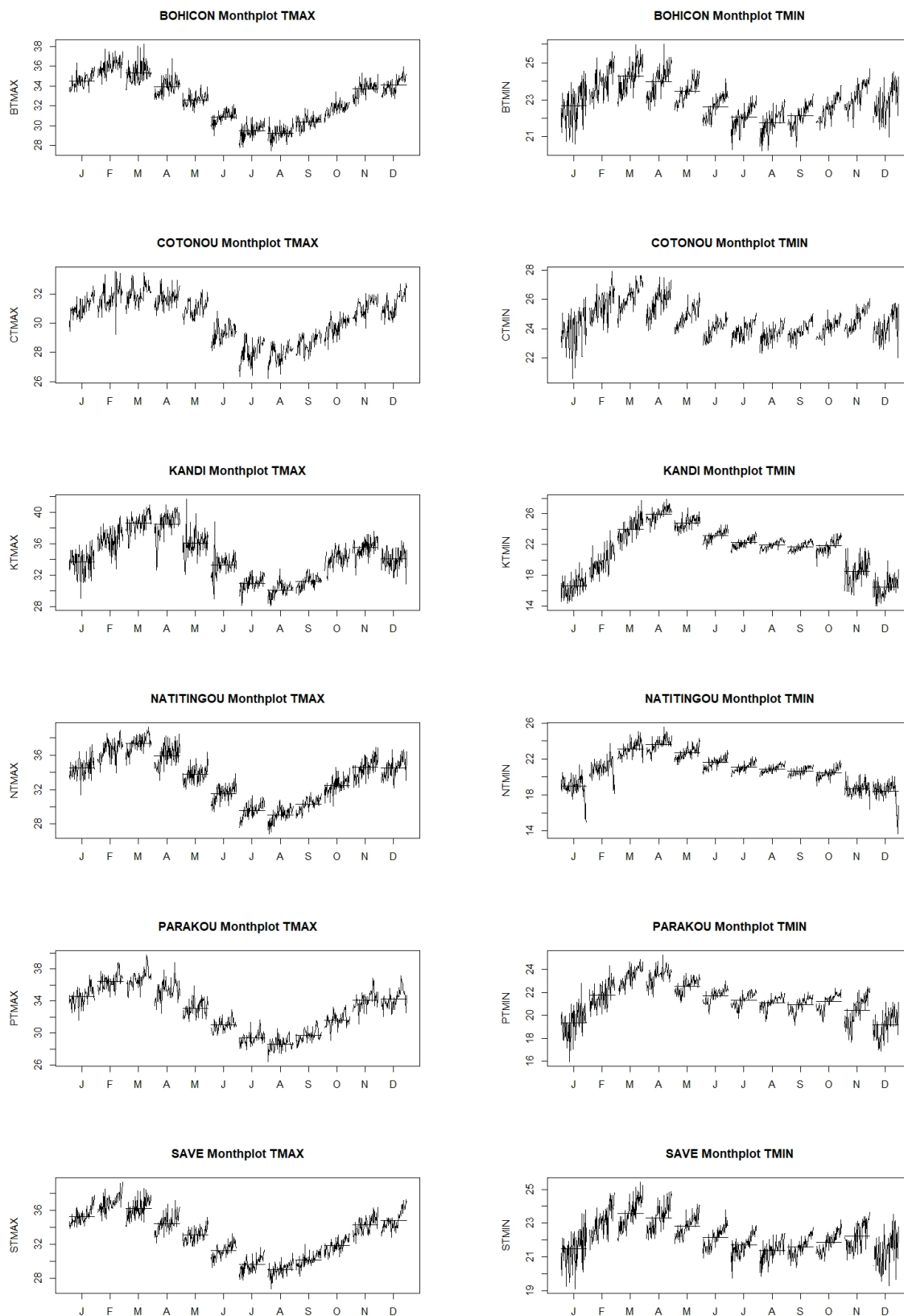


FIGURE 3.9 – Chronogrammes des moyennes mensuelles de températures des six stations

TABLE 3.9 – Synthèse du test de tendance de Mann-Kendall relatif aux moyennes annuelles des températures maximale et minimale

Test de M-K	Kandi		Natitingou		Parakou		Savè		Bohicon		Cotonou	
	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN
Pente	0.024	0.032	0.029	0.014	0.027	0.034	0.032	0.028	0.019	0.028	0.017	0.026
p-value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	39.1	75.7	67.4	37.7	37	70.1	71.3	75.7	53.1	73.6	39.6	76.8
Erreur pente	0.004	0.002	0.003	0.002	0.005	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002

Les résultats montrent que la tendance est croissante et significative pour les deux températures et sur les six stations. On note donc une augmentation de la moyenne annuelle de la température maximale comprise entre 0,17°C/décennie (à Cotonou) et 0,32°C/décennie (à Savè). Alors que la moyenne annuelle de la température minimale subie une augmentation comprise entre 0,14°C/décennie (Natitingou) et 0,34°C/décennie (à Parakou). On remarque que la vitesse moyenne d'augmentation de température au Bénin est supérieure à la moyenne mondiale estimée par le GIEC (2007) sur la période 1956 et 2005 et qui est comprise entre 0,13°C/décennie et 0.03°C/décennie.

2.3 Tendances des indices des extrêmes de températures

La tendance de ces indices a été analysée de la même manière que ceux des précipitations. Dans cette étude, La figure 3-10 présente les sorties du RclimDex de l'indice SU25 (Nombre annuel de jours d'été) pour les six stations synoptiques. Les figures des autres indices pour ces six stations se trouvent en annexes. La synthèse des sorties du RclimDex des treize indices des extrêmes de température, pour les six stations synoptiques, pour la période 1955 à 2016, est présentée dans le tableau 3-11. L'analyse de ces résultats est présentée dans le tableau 3-12.

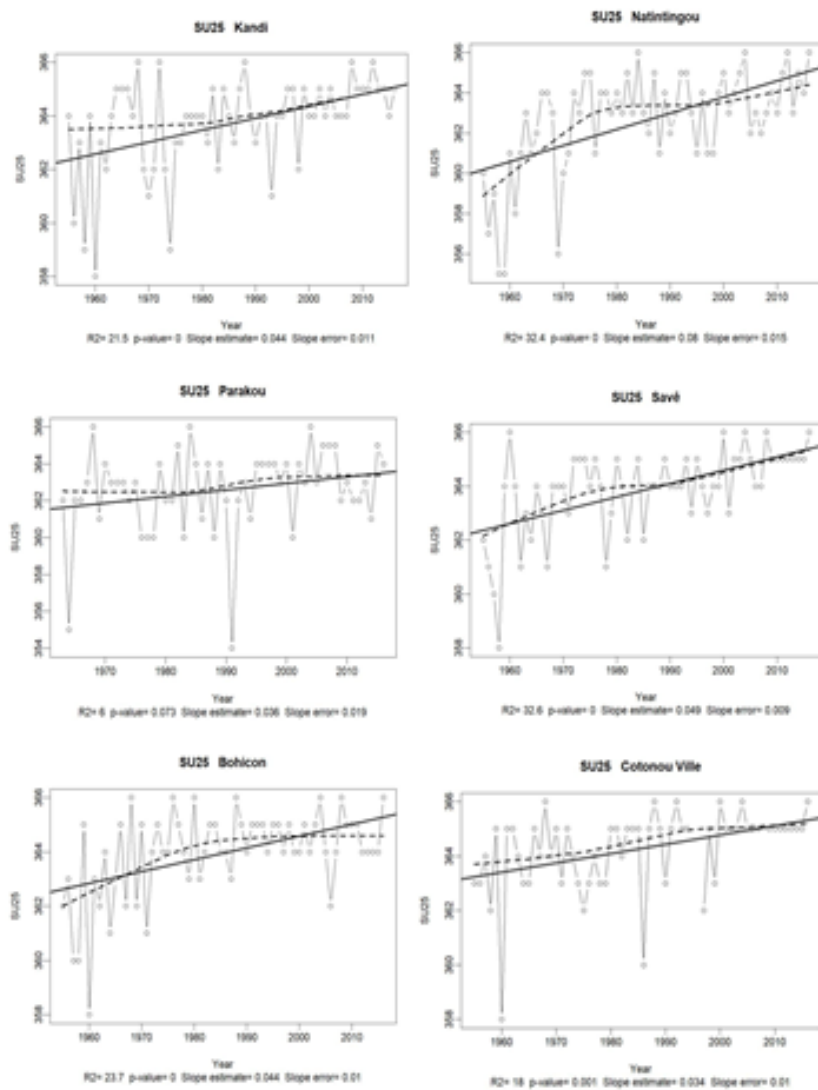


FIGURE 3.10 – Sortie RClmDex, indice du nombre annuel de jours d’été (SU25), des 06 stations synoptiques

TABLE 3.10 – Pourcentage significativité et de signe des tendances des indices des extrêmes de températures pour les 06 stations synoptiques sur la période 1955-2016

Indices	Significativité des tendances MK				Signe	
	(***)	(**)	(*)	Pas Significative	Positif	Négatif
SU25	83	0	17	0	100	0
TR20	83	17	0	0	100	0
TXX	100	17	0	0	100	0
TXN	50	17	17	16	100	0
TNX	100	0	0	0	100	0
TNN	83	17	0	0	83	17
TX10p	100	0	0	0	0	100
TX90p	100	0	0	0	100	0
TN10p	83	0	0	17	0	100
TN90p	100	0	0	0	100	0
WSDI	50	17	0	33	100	0
CSDI	50	33	0	17	17	87
DTR	33	17	33	17	33	67

Les résultats indiquent que la quasi-totalité des indices ont une tendance significative sur les six stations synoptiques, 1955 à 2016, et qui montrent que le réchauffement de la planète est effectif au Bénin. Ainsi, on note :

- une augmentation du nombre de jours d'été (SU25) et de nuits tropicales (TR20) ;
- une augmentation des maxima et des minima de températures nocturnes et diurnes (TXX, TNx, TXn et TNn) ;
- une augmentation du nombre de jours et de nuits chauds (TX90p et TN90p)
- une augmentation de l'indicateur de durée des séquences chaudes (WSDI)
- une diminution du nombre jours et de nuits frais (TX10p et TN10p) ;
- une diminution de l'indicateur de durée des séquences fraîches (CSDI).

TABLE 3.11 – La pente de Mann-Kendall et l'identifiant de l'intervalle de la p-value des treize indices des extrêmes de températures des six stations synoptiques, de 1986 à 2016

Indices	Kandi	Natitingou	Parakou	Savè	Bohicon	Cotonou
SU25	0.044***	0.080***	0.036*	0.049***	0.044***	0.036***
TR20	0.779***	0.994***	2.072***	0.590**	0.381***	0.023
TXx	0.031***	0.046***	0.033***	0.031***	0.016***	0.026***
TXn	0.014**	0.025***	0.013*	0.033***	0.007	0.016***
TNx	0.035***	0.030***	0.030***	0.034***	0.032***	0.020***
TNn	0.044***	-0.027***	0.044***	0.025***	0.058***	0.020**
TX10p	-0.139***	-0.196***	-0.195***	-0.246***	-0.198***	-0.247***
TX90p	0.245***	0.307***	0.349***	0.436***	0.201***	0.188***
TN10p	-0.297***	-0.068*	-0.391***	-0.296***	-0.322***	-0.221***
TN90p	0.349***	0.327***	0.411***	0.499***	0.495***	0.404***
WSDI	0.210***	0.226***	0.343**	0.357***	0.089	0.051
CSDI	-0.144***	0.287***	-0.105***	-0.100**	-0.109**	-0.047
DTR	-0.008*	0.016***	-0.007	0.005*	-0.009***	-0.009***

TABLE 3.12 – Analyse des résultats du RclimDex des treize indices d'extrêmes de températures des six stations synoptiques au Bénin, de 1955 à 2016

N°	Indice	Résultat et analyse	Synthèse
1	Nombre annuel de jours d'été (SU25)	Le nombre jours dont la température diurne est supérieure à 25°C, croit sur les six stations. Cette croissance est non significative uniquement sur la station (Parakou)	Augmentation significative : - plus faible : 0,36jours/décennie(Cotonou) ; - plus forte : 0,8jours/décennie (Natingou).
2	Nombre annuel de nuits tropicales (TR20)	Le nombre de nuits dont la température nocturne est supérieure à 20°C, croit sur les six stations. Cette croissance est non significative uniquement sur la station (Cotonou)	Augmentation significative : - plus faible : 3,8jours/décennie(Bohicon) ; - plus forte : 20,7jours/décennie (Parakou). (à vérifier)
3	Maximum des températures diurnes (TXx)	Le maximum des températures diurnes croit sur les six stations de manière significative.	Augmentation significative : - plus faible : 0,16°C/décennie(Bohicon) ; - plus forte : 0,46°C/décennie (Natingou).
4	Minimum des températures diurnes (TXn)	Croissance du minimum des températures diurnes sur toutes les stations. Elle non significative à Parakou et à Bohicon.	Augmentation significative : - plus faible : 0,14°C/décennie(Kandi) ; - plus forte : 0,33°C/décennie (Savè).
5	Maximum des températures nocturnes (TNx)	Croissance significative du maximum des températures nocturnes sur toutes les stations	Augmentation significative : - plus faible : 0,20°C/décennie (Cotonou) ; - plus forte : 0,35°C/décennie (Kandi).

N°	Indice	Résultat et analyse	Synthèse
6	Minimum des températures nocturnes (TNn)	Croissance significative du minimum des températures nocturnes sur toutes les stations sauf à Natitingou où on a décroissance significative	Augmentation significative : - plus faible : 0,20°C/décennie (Cotonou); - plus forte : 0,58°C/décennie (Bohicon).
7	Nombre de jours frais (TX10p ou TX10)	Le nombre de jours frais décroît significativement sur toutes les stations.	Diminution significative : - plus faible : 1,39jours/décennie (Kandi); - plus forte : 2,47jours/décennie (Cotonou).
8	Nombre de jours chauds (TX90p ou TX90)	Le nombre de jours chauds croît significativement sur toutes les stations.	Augmentation significative : - plus faible : 1,89jours/décennie(Cotonou); - plus forte : 4,36jours/décennie (Savè).
9	Nombre de nuits fraîches (TN10p ou TN10)	Décroissance significative du nombre de nuits fraîches sur toutes les stations. Elle n'est pas significative à Natitingou.	Diminution significative : - plus faible : 2,21jours/décennie (Cotonou); - plus forte : 3,91jours/décennie (Parakou).
10	Nombre de nuits chaudes (TN90p ou TN90)	Croissance significative du nombre de nuits chaudes sur toutes les stations.	Augmentation significative : - plus faible : 3,27jours/décennie(Natitingou); - plus forte : 4,99jours/décennie (Savè).
11	Indicateur de durée des séquences chaudes (WSDI)	La durée des séquences chaudes croît sur toutes les stations. La croissance n'est pas significative à Bohicon et à Cotonou.	Augmentation significative : - plus faible : 2,10jours/décennie(Kandi); - plus forte : 3,57jours/décennie (Savè).

N°	Indice	Résultat et analyse	Synthèse
12	Indicateur de durée des séquences fraîches (CSDI)	La durée des séquences fraîches décroît significativement sur toutes les stations sauf à Natitingou ou elle croît aussi significativement. La décroissance n'est pas significative à Cotonou.	Diminution significative : - plus faible : 1,00jours/décennie (Savè); - plus forte : 1,44jours/décennie (Kandi).
13	Amplitude thermique diurne (DTR)	Amplitude thermique diurne décroît sur 4 stations. Elle décroît non significativement sur deux stations sur quatre. Elle croît significativement à Natitingou et non significativement à Savè.	Difficile de conclure sur cet indice

3 Limites des résultats

La principale limite des résultats ce travail est l'existence de quelques données manquantes de précipitations. Ces données ont été négligées dans l'analyse avec le RclimDex et remplacées par zéro (considérer comme jour non pluvieux) dans le calcul de l'indice de concentration de précipitations mensuelles, le calcul de l'indice d'anomalie du cumul annuel de précipitations et le calcul du cycle saisonnier. On pourrait chercher des méthodes pour corriger ces lacunes. Par ailleurs, des tests d'homogénéité au sein des zones climatiques et d'hétérogénéité entre les zones climatiques sont nécessaires pour confirmer la division en zones de notre région d'étude. D'autre part, la représentativité d'une zone climatique par une station n'est pas discutée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous nous sommes intéressé fondamentalement à la variabilité spatio-temporelle des extrêmes de climat au Bénin. Il a fallu d'abord déterminer les zones climatiques en fonction de certains indicateurs relatifs à la pluviométrie, notamment l'indice de concentration des précipitations. Le constat est que le Bénin peut être subdivisé en cinq (08) zones climatiques :

- la première couvre tout le département de l'Alibori ;
- la deuxième regroupe le département de l'Atacora et la partie nord du département de la Donga
- la troisième zone comprend et la grande partie du Borgou ;
- la quatrième couvre le sud de la Donga ainsi que le sud du Borgou,
- la cinquième zone climatique englobe aussi le département des Collines ;
- la sixième zone est celle regroupant le département du Zou et d'autres régions proches à l'exception de la zone côtière ;
- la septième est située entre la zone côtière la zone climatique du zou ;
- la huitième et dernière zone climatique est celle balayant toute la région côtière du pays.

Le climat du Bénin est considérablement influencé par la rareté pluviométrique accompagnée d'un réchauffement de plus en plus intense. En effet, les périodes chaudes sont de plus en plus récurrentes, et dans cette récurrence, les températures sont de plus en plus élevées. L'analyse des tendances des moyennes annuelles de températures diurnes et nocturnes a révélé une augmentation généralisée sur l'ensemble des six stations synoptiques. Toutes les régions se réchauffent de jours comme de nuit. Cette hausse de la température est de plus en plus marquée au fur et à mesure qu'on monte en latitude. Mais à Natitingou, la vitesse d'augmentation de la température minimale annuelle est relativement faible par rapport à celle des autres villes.

En effectuant l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des extrêmes à travers l'analyse des tendances des indices d'extrêmes climatiques du RclimDex, on remarque que le minimum des températures minimales (TNn) diminue significativement. Ce qui explique cette faible vitesse d'augmentation de la moyenne annuelle des températures minimales (TMAXmean). Le maximum des températures maximales (TXx) affiche une vitesse d'augmentation plus importante que celle des autres villes. Natitingou se réchauffe de plus en plus durant le jour et connaît à la fois des conditions de froid extrême. Par ailleurs, nous avons noté qu'il n'existe pas de variabilité spatiale en termes d'occurrences d'années déficitaires ou excédentaires. Toutefois, on doit se demander s'il y a de cor-

rélation entre les années déficitaires (ou excédentaires) des zones climatiques ?

En termes de perspectives, nous envisageons :

- Faire un test d'homogénéité à l'intérieur de zones climatiques et d'hétérogénéité entre les zones.
- Analyser la représentativité des stations choisis au sein des zones climatiques en comparant les indices de précipitations de ces stations à ceux des pluies moyennes journalières des zones.
- Analyser les tendances des indices de précipitations sur les saisons des pluies.
- Analyser les tendances des indices de précipitations sur des périodes de trois décennies emboîtées : 1955-1985, 1965-1995, 1975-2005, 1985-2016 en vue d'identifier les changements de phases dans les tendances.
- Définir les caractéristiques des cycles saisonniers et analyser les tendances de ces caractéristiques.
- Modéliser le cycle annuel de température puis analyser les tendances de ces caractéristiques.

ANNEXES

TABLE 5.1 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 1

Kandi	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	0.102	-0.438	0.025	-0.032	-0.023	-0.018	0.378	-0.021	0.748	-0.03	-0.917
p-value	0.549	0.113	0.062	0.364	0.402	0.419	0.077	0.15	0.388	0.961	0.438
R2	0.6	4.1	5.7	1.4	1.2	1.1	5.1	3.4	1.2	0	1
Erreur	0.17	0.272	0.013	0.035	0.027	0.022	0.21	0.014	0.859	0.615	1.175

TABLE 5.2 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 2

Natingou	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	-0.256	-0.411	-0.007	-0.116	-0.058	-0.057	0.195	-0.035	-1.982	-1.128	-4.008
p-value	0.082	0.033	0.537	0.02	0.113	0.056	0.362	0.081	0.043	0.068	0.011
R2	5	7.5	0.6	8.9	4.2	6.1	1.4	5.1	6.8	5.5	10.4
Erreur	0.145	0.188	0.011	0.048	0.036	0.029	0.213	0.02	0.958	0.606	1.53

TABLE 5.3 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 3

Bembereke	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	-0.202	-0.495	-0.01	-0.116	-0.073	-0.054	0.25	-0.024	-1.189	-0.585	-3.417
p-value	0.177	0.038	0.602	0.03	0.038	0.094	0.258	0.025	0.218	0.231	0.039
R2	3.3	7.6	0.5	8.3	7.6	5	2.3	8.8	2.7	2.6	7.5
Erreur	0.148	0.233	0.019	0.052	0.035	0.032	0.219	0.01	0.955	0.483	1.617

TABLE 5.4 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 4

Djougou	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	0.166	0	-0.028	-0.014	-0.027	-0.04	0.17	0.004	-0.205	0.664	-1.226
p-value	0.34	0.999	0.078	0.791	0.514	0.257	0.499	0.784	0.836	0.333	0.474
R2	2	0	6.3	0.2	0.9	2.7	1	0.2	0.1	2	1.1
Erreur	0.173	0.259	0.015	0.051	0.041	0.035	0.249	0.016	0.984	0.679	1.697

TABLE 5.5 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 5

Savè	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	-0.155	-0.406	0.017	-0.029	0.001	0.01	0.171	-0.016	-2.165	-0.407	-2.095
p-value	0.389	0.124	0.195	0.58	0.988	0.735	0.374	0.186	0.052	0.531	0.229
R2	1.2	3.9	2.8	0.5	0	0.0	1.3	2.9	6.1	0.7	2.4
Erreur	0.179	0.261	0.013	0.051	0.037	0.029	0.191	0.012	1.094	0.646	1.725

TABLE 5.6 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 6

Bohicon	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	0.16	0.098	0.034	-0.059	-0.034	-0.006	0.367	-0.024	0.788	0.11	-1.455
p-value	0.28	0.614	0.014	0.28	0.398	0.842	0.054	0.014	0.404	0.852	0.426
R2	1.9	0.4	9.7	2	1.2	0.1	6	9.6	1.2	0.1	1.1
Erreur	0.15	0.194	0.013	0.054	0.04	0.032	0.187	0.01	0.936	0.593	1.813

TABLE 5.7 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 7

Niaouli	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	-0.143	-0.554	0.019	-0.234	-0.098	-0.08	0.166	-0.027	-1.034	-0.607	-6.308
p-value	0.426	0.111	0.33	0.004	0.063	0.068	0.441	0.02	0.464	0.449	0.02
R2	1.2	4.7	1.8	14.4	6.4	6.2	1.1	9.8	1	1.1	9.8
Erreur	0.178	0.341	0.02	0.078	0.051	0.043	0.215	0.011	1.401	0.796	2.623

TABLE 5.8 – Analyse de tendance de M-K des indices de précipitations - Zone 8

Cotonou	RX1	RX5	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95	R99	PRCPTOT
Coef MK	-0.66	-1.183	0.029	-0.062	-0.028	-0.057	0.58	-0.047	-2.466	-1.141	-4.625
p-value	0.025	0.047	0.294	0.361	0.61	0.215	0.002	0.014	0.166	0.218	0.145
R2	10.1	8	2.3	1.7	0.5	3.2	17.2	12	4	3.1	4.4
Erreur	0.287	0.58	0.027	0.068	0.055	0.045	0.182	0.019	1.755	0.913	3.122

RÉFÉRENCES

Aguilar E, Peterson TC, Ramirez Obando P, et al., 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *J. Geophys. Res.* 110 : D23107.1–D23107.15, doi : 10.1029/2005JD006119.

Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, et al., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 111 : D05109, doi : 10.1029/2005JD006290.

Attogouinon, A. ; Lawin, A.E. ; M'Po, Y.N. ; Houngue, R. Extreme Precipitation Indices Trend Assessment over the Upper Ouémé River Valley-(Bénin). *Hydrology* 2017, 4, 36.

Choi, G. Collins, D. Ren, G, et al., 2009, Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955–2007, *Int. J. Climatol.* 29 : 1906–1925, DOI : 10.1002/joc.1979.

De Longueville, F, Hountondji, Y., Kindo, I., Gemenne, F, and Ozer, P, 2016, Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950–2013), *Int. J. Climatol.*, DOI : 10.1002/joc.4640.

Hounguè, R. ; Lawin, E. ; Moumouni, S. ; Afouda, A. A. Change in Climate Extremes and Pan Evaporation Influencing Factors over Ouémé Delta in Bénin. *Climate* 2019, 7, 22, doi :10.3390/cli7010002

Hountondji, Y. ; Ozer, P Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. In *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment And Climate Changes*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 26–27 August 2011 ; pp. 1–7.

N'Tcha M'Po, Y. ; Lawin, E. ; Yao, B. ; Oyerinde, G. ; Attogouinon, A. ; Afouda, A. Decreasing Past and Mid-Century Rainfall Indices over the Ouémé River Basin, Benin (West Africa). *Climate* 2017, 5, 74.

Soro, G.E. ; Noufé, D. ; Albert, T. ; Bi, G. ; Shorohou, B. Trend Analysis for Extreme Rainfall at Sub-Daily and Daily Timescales in Côte d'Ivoire. *Climate* 2016, 4, 1–15.