

UNIVERSITE DE KINSHASA



**FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DE GESTION DES
RESSOURCES NATURELLES**

OPTION : SOL ET EAU

B.P. 117 Kinshasa XI



**Evaluation régionale de la variabilité et
du changement climatique dans les
Bassins du Lac Tchad et du fleuve Congo**

Par NGANDU KABUYI Jean-Felly

**Mémoire rédigé en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes
Approfondies en Gestion des Ressources Naturelles**

Option : Sol et Eau

Mémoire présenté et défendu devant le jury composé de :

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| • Prof. KINKELA SAVY SUNDA Charles | : Président du jury |
| • Prof. SUMBU ZOLA LEZI Éric | : Secrétaire du jury |
| • Prof. TSHIMANGA MUAMBA Raphael | : Promoteur et Membre effectif |
| • Prof. TSHITENGE MBUEBUE Jean-Marie | : Co-promoteur et Membre effectif |
| • Prof. LUMBUENAMO NSISI Raymond | : Membre effectif |
| • Prof. KISANGALA MOKE Modeste | : Membres suppléant |
| • Prof. SIKULISIMWA POLE Céline | : Membres suppléant |

AOUT 2021

TABLEDES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	I
LISTE DES TABLEAUX	II
DEDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT	VIII
INTRODUCTION	1
CONTEXTE DE L'ÉTUDE	1
QUESTIONS DE RECHERCHE	3
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	3
HYPOTHÈSES	3
INTERET DE L'ETUDE.....	4
SUBDIVISION DU TRAVAIL	4
Chapitre I : APERÇU GENERAL SUR LA VARIABILITE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AFRIQUE	5
1.1. CADRE CONCEPTUEL.....	5
1.2. CHANGEMENTS ET VARIABILITES CLIMATIQUES EN AFRIQUE.....	6
1.2.1. Etat des connaissances du climat africain.....	6
1.2.2. Variabilité climatique dans la région intertropicale : éléments majeurs de la circulation atmosphérique.....	10
1.2.3. Changements climatiques en Afrique	12
1.3. VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	16
1.3.1. Principales approches de vulnérabilité au changement climatique	16
1.3.2. Mesure de la vulnérabilité au changement climatique	19
1.4. SCENARIOS FUTURES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE	20
1.4.1. Principes de base de la modélisation climatique.....	21
1.4.2. Scénarios de changement climatique	23
Chapitre II : CADRE D'ETUDE, DONNEES ET METHODES.....	26
2.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	26
2.1.1. Localisation.....	26
2.1.2. Caractéristiques climatiques	27

2.1.3.	Ressources en eau	29
2.1.4.	Caractéristiques socio-économiques	36
2.2.	DONNEES	38
2.3.	METHODES.....	41
2.3.1.	Analyse de la variabilité des séries chronologiques.....	41
2.3.2.	Calcul de l'Indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI). 44	
2.3.3.	Analyse spatio-temporelle de la variabilité pluviométrique.....	45
2.3.4.	Analyse des scénarios de changement climatique	45
Chapitre III : ANALYSE DE LA VARIABILITE ET TENDANCE CLIMATIQUE DANS LA ZONE D'ETUDE..... 47		
3.1.	DETECTION DE LA VARIABILITE TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS	47
3.1.1.	Caractérisation de la variabilité annuelle des précipitations et moyennes décennales	47
3.1.2.	Caractérisation des périodes sèches et humides.....	48
3.1.3.	Classification des régions pluviométriques.....	50
3.1.4.	Mise en évidence des ruptures pluviométriques.....	52
3.1.5.	Vulnérabilité au niveau régional : catégories de sécheresse déterminées à l'aide de l'Indice Standardisé d'Evapotranspiration et de Précipitation (SPEI).....	53
4.1.	EVALUATION DE LA SAISONNALITE DE PRECIPITATION PAR APPLICATION DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX	57
4.2.	ANALYSE DES SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE A LA STATION DE BAMBESA	58
4.2.1.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE NDJAMENA.....	58
4.2.2.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BARA	59
4.2.3.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BATOURI	60
4.2.4.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE MBANDAKA	61
4.2.5.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BUTEMBO	62
4.2.6.	EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BAMBESA.....	63
4.3.	DISCUSSION	65
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		67
BIBLIOGRAPHIE.....		70
ANNEXES.....		77

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Oscillation d'El Niño en Afrique australe et de l'Est (Source : Centre de Prédiction Climatique NCEP).....	13
Figure 2 : Voies de concentrations représentatives du GIEC (Source : GIEC, 2014)	24
Figure 3 : Situation géographique de la zone d'étude	26
Figure 4 : Classification climatique selon le système Köppen- Geiger.....	27
Figure 5 : Réseau hydrographique de la zone d'étude	31
Figure 6 : Paysages du lac Tchad depuis la fin des années 1990 (d'après Lemoalle, 2015.....	33
Figure 7 : Évolution du lac Tchad depuis les années 60 (source : NASA pour CBLT, 2008)	34
Figure 8 : Évolution observée et/ou simulée de la surface inondée de la cuvette nord (Sn), de l'ensemble de la cuvette sud (Ss+Sa) et du lac entier (S total) de 1972 à 2012 (Bader et al., 2011).....	35
Figure 9 : Distributions mensuelles des pluies selon les données FAO, CRU, CHIRPS, SIEREM et des stations au sol.....	39
Figure 10 : Situation géographique de stations au sol utilisées dans cette étude	41
Figure 11 : Evolution interannuelle des cumuls des pluies annuelles (en bleu), et moyennes décennales (valeurs en mm) (en rouge)	48
Figure 12 : Fluctuations pluviométriques par application de l'indice des précipitations standardisée	49
Figure 13 : Classification des régions de variabilité des précipitations sur base des écarts par rapport à la moyenne mobile de 5 ans (axe du temps non lisible sur certains graphes)	51
Figure 14 : Evolution fréquentielle des catégories de sécheresse avec le SPEI à l'échelle de 12 mois	54
Figure 15 : Distribution spatiale annuelle de la pluviométrie de la région d'étude	56
Figure 16 : Distributions mensuelles de la pluviométrie par station selon les différents modèles climatiques globaux.....	57
Figure 17 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Ndjamenas	58
Figure 18 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Bara	59
Figure 19 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Batouri.....	60
Figure 20 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Mbandaka	61
Figure 21 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Butembo.....	62

Figure 22 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Bambesa..... 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Source : Moss et al, 2010).....	25
Tableau 2. Catégorisation du degré de sécheresse/ humidité en fonction du SPEI	45
Tableau 3 : Résolutions et abréviations des six modèles utilisés	46
Tableau 4 : Moment présumé de rupture sur les cumuls annuels	52
Tableau 5 : Moyennes avant et après la date de rupture.....	53

DEDICACE

A ma regrettée mère, NGALULA wa NGANDU Angélique, je dédie ce travail. J'aurais tout donné pour qu'elle soit là afin de réaliser jusqu'où ses sacrifices ont pu m'amener.

REMERCIEMENTS

Lorsque je me suis engagé dans ce programme de DEA, je n'avais aucune idée de ce que cela valait exactement. Aujourd'hui, je compile un peu plus de deux longues années de recherche dans ces quelques pages. Et avec le bénéfice d'un recul, aussi minime soit-il, je réalise que cette étude est certainement l'une des expériences les plus enrichissantes, tant sur le plan personnel que professionnel, qu'il m'ait été donné de vivre. Au cours de ce travail de recherche, j'ai bénéficié du soutien et de l'appui de nombreuses personnes, que je tiens à remercier ici.

Mes pensées s'orientent avant tout vers Dieu en qui j'ai la vie, le mouvement et l'être (Actes des Apôtres 17 : 28). Qu'il soit glorifié pour ses bienfaits en faveur de ma modeste personne.

Ensuite, mon Promoteur, le Professeur Raphaël Tshimanga Muamba, pour la confiance qu'il m'a accordée. Au-delà d'un encadrement scientifique de qualité, Prof. Raphaël a toujours su prendre le temps de m'écouter, de me conseiller et de m'encourager. Je ne saurai trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude relative à tous les sacrifices qu'il consent en faveur de ma formation et de mon épanouissement en tant qu'humain, mais qu'il trouve dans ces quelques lignes une marque de respect et l'expression de mon admiration pour lui.

J'adresse également mes remerciements au Professeur TSHITENGE MBUEBUE Jean-Marie, qui a accepté de codiriger ce travail. Qu'il trouve ici une marque de gratitude pour ces orientations scientifiques.

Je pense aussi aux collègues qui nous ont aidé dans la réalisation de ce travail. Il s'agit principalement de Génie Spirou Lutonadio, Landry Nkaba, Gode Bola, Augustin Likenge, Lisette Bonso, Emmanuel Ngwamashi et Prisca Sumbu. Que les autres collègues qui ont, d'une manière ou d'une autre, assisté à la réalisation de ce travail trouvent également la preuve de notre gratitude à travers ces lignes.

Une mention spéciale à mon épouse, Gisèle Milemba Ngandu, et tous mes enfants, pour l'appui et l'accompagnement dont ils n'ont cessé de me démontrer dans la réalisation de cette étude. A eux, je leur demande de croiser les doigts, c'est de moment d'intenses sacrifices qui ne manquent jamais de payer lorsqu'on s'accroche jusqu'au bout.

Je n'oublierais pas non plus la disponibilité et la coopération d'autres amis et collègues de promotion, particulièrement Gérard Sankiana, Odette Alifua, Augustin Lamulamu, Xavier Kusekana, et Hervé Ngonde.

Qu'il me soit également permis de souligner la participation collective de beaucoup d'autres personnes : collaborateurs, frères et amis, trop nombreux pour être cités ici. Je leur sais gré des contributions multiformes qu'ils m'ont régulièrement apportées dans mes travaux et tout particulièrement dans la réalisation de cette étude et je tiens à dire à tous mes remerciements.

Pour clore, je remercie les membres de ma grande famille, et mes Professeurs pour leur soutien intellectuel, moral et spirituel.

RÉSUMÉ

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une analyse systémique des interactions existant entre les migrations et les conflits liés au changement climatique et à l'eau, en vue de renforcer la résilience des communautés dans le Bassin du Congo.

D'un côté, on note que le bassin du fleuve Congo qui dispose d'un potentiel important en ressources en eau, génère à lui seul environ 40 % du débit total du continent africain. D'un autre côté, les estimations de divers experts indiquent que près d'un tiers de la population africaine vit dans des zones arides, et que chaque année plusieurs millions d'africains sont exposés aux impacts de la sécheresse. Malgré les efforts déployés pour déterminer la cause de la sécheresse au Sahel, les chercheurs s'interrogent encore sur ses origines.

Cette situation de sécheresse au Sahel a alors contraint les éleveurs à migrer vers les zones encore arrosées. Ils ont envahi la partie Nord du Bassin du Congo, particulièrement la partie Nord-Est de la République Démocratique du Congo, et ont accru les pressions sur les différentes ressources naturelles, notamment les ressources en eau. Pourtant, comparativement à d'autres régions où plusieurs études ont été menées, des incertitudes pèsent encore sur l'évolution attendue du climat dans cette partie du continent, et notamment des précipitations. Il est actuellement prouvé que le bassin du fleuve Congo subit les effets du changement climatique malgré le fait que la région soit largement caractérisée par de nombreuses ressources en eau et une importante biodiversité.

Le défi est dès lors de faire une évaluation de la variabilité des facteurs climatiques dans la zone d'étude en vue de prévoir les conséquences et les implications sur les ressources en eau et les services écosystémiques dans un contexte de pressions anthropiques, notamment celles liées aux mouvements des migrants et aux conflits qui en résultent.

L'analyse bibliographique sur la variabilité pluviométrique menée dans cette étude révèle que la sécheresse actuelle qui est intervenue à la fin des années 60 apparaît comme un phénomène anormal qui se distingue des autres sécheresses persistantes qui se sont déjà produites depuis le début du siècle par sa durée, son intensité et son extension.

L'application de différentes méthodes statistiques aux séries chronologiques de variables caractéristiques du régime pluviométrique montre que globalement sur la zone d'étude, la pluviométrie annuelle connaît une grande variabilité spatio-temporelle. Pendant que d'autres stations continuent d'enregistrer le phénomène de sécheresse, il est observé un renversement de situation sur certaines stations, qui voient leur pluviométrie connaître une tendance à la hausse à partir de la décennie 1990. C'est le cas des stations d'Abeche, Yao, Ndjamena et Bara, qui signent un retour aux conditions humides, avec des moyennes pluviométriques respectives de 497 mm, 561 mm et 1018 mm, soit 14 %, 5 % et 3%, des totaux pluviométriques supérieurs aux normales climatiques de 1961 à 1990.

De l'analyse des scénarios climatiques futurs, il ressort que cinq des six modèles climatiques globaux utilisés s'accordent sur une diminution sensible des précipitations dans certaines parties du Bassin du Congo durant la période allant de 2041 à 2100. Ainsi, les prévisions les plus pessimistes indiquent une baisse des précipitations de près de 16 % par rapport à la décennie de référence considérée (1994 – 2003), et les périodes les plus sèches seront les décennies 2051 – 2060, qui connaîtront une diminution des précipitations de plus de 19 % par rapport à la période de référence.

MOTS-CLÉS : Variabilité climatique, pluviométrie, changement climatique, ressources en eau, sécheresse, modélisation climatiques globaux, vulnérabilité, scénarios climatiques.

ABSTRACT

This study is part of a systemic analysis of the interactions between migration and conflicts related to climate change and water, with the aim of strengthening the resilience of communities in the Congo Basin.

On one hand, it is noted that the Congo River Basin, which has significant water resources potential, generates about 40% of the total flow of the African continent. On the other hand, estimates by various experts indicate that almost one third of the African population lives in drylands, and that each year several million Africans are exposed to the impacts of drought. Despite efforts to determine the cause of drought in the Sahel, researchers are still wondering about its origins.

The drought situation in the Sahel has forced pastoralists to migrate to areas that still have water. They invaded the northern part of the Congo Basin, particularly the north-eastern part of the Democratic Republic of Congo, and increased the pressure on various natural resources, particularly water resources. However, compared to other regions where several studies have been carried out, there are still uncertainties about the expected evolution of the climate in this part of the continent, and in particular of rainfall. There is currently evidence that the Congo River Basin is experiencing the effects of climate change despite the fact that the region is largely characterized by abundant water resources and biodiversity.

The challenge is therefore to assess the variability of climatic factors in the study area with a view to predicting the consequences and implications for water resources and ecosystem services in a context of anthropogenic pressures, particularly those linked to migrant movements and the resulting conflicts.

The literature review on rainfall variability conducted in this study reveals that the current drought that occurred in the late 1960s appears to be an anomalous phenomenon that differs from other persistent droughts that have already occurred since the beginning of the century in terms of its duration, intensity and extension.

The application of different statistical methods to the time series of variables characteristic of the rainfall regime shows that, overall in the study area, annual rainfall is highly variable in

space and time. While other stations continue to experience drought, a reversal of the situation is observed at certain stations, which have seen an upward trend in rainfall since the 1990s. This is the case for the stations of Abeche, Yao, Ndjamen and Bara, which show a return to wet conditions, with average rainfall of 497 mm, 561 mm and 1018 mm respectively, i.e. 14%, 5% and 3% of total rainfall above the 1961-1990 climate normals.

The analysis of future climate scenarios shows that five of the six global climate models used agree on a significant decrease in rainfall in certain parts of the Congo Basin during the period from 2041 to 2100. Thus, the most pessimistic forecasts indicate a decrease in rainfall of almost 16% compared to the reference decade considered (1994 - 2003), and the driest periods will be the decades 2051 - 2060, which will see a decrease in rainfall of more than 19% compared to the reference period.

KEYWORDS: Climate variability, rainfall, climate change, water resources, drought, global climate modelling, vulnerability, climate scenarios.

INTRODUCTION

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Le bassin du fleuve Congo dispose d'un potentiel important en ressources en eau, et génère à lui seul un débit moyen de 41 000 m³/s à son exutoire, ce qui représente environ 40 % du débit total du continent africain (Tshimanga, 2012). Cet énorme potentiel en ressources en eau est susceptible de stimuler le développement de multiples biens et services dont l'agriculture, l'approvisionnement en eau, l'hydroélectricité, la pêche, le transport, et le maintien des écosystèmes. Ce potentiel constitue également un atout majeur pour le développement des stratégies visant à pallier aux défis de la rareté de l'eau, offrant ainsi les opportunités d'améliorer la sécurité de l'eau en Afrique.

D'un autre côté, les estimations de divers experts indiquent que près d'un tiers de la population africaine vit dans des zones arides, et que chaque année plusieurs millions d'africains sont exposés aux impacts de la sécheresse (Pomerleau, 2009). Depuis les années 1980, des sécheresses récurrentes ont frappé l'Afrique subsaharienne, et la tristement célèbre sécheresse de 1984-1985 a causé d'importantes pertes en vies humaines et en biens économiques. Pourtant, cette région avait déjà connu des épisodes de sécheresse au début des années 1970, qui ont provoqué une crise humanitaire et la mort de plusieurs milliers de personnes et de millions d'animaux (de Waal, 1997 ; Mortimore, 1998). Or, l'agropastoralisme à grande échelle fréquemment pratiqué dans cette région est particulièrement sensible aux longues périodes de sécheresse au cours desquelles les pâturages s'épuisent, sans possibilité de renouvellement.

Malgré les efforts déployés pour déterminer la cause de la sécheresse au Sahel, les chercheurs s'interrogent encore sur ses origines. À ce jour, il n'existe pas de preuves concluantes du rôle des gaz à effet de serre dans le déclenchement ou l'aggravation de la sécheresse (Christensen, et al, 2007). La variabilité des précipitations au Sahel peut peut-être s'expliquer par des interactions complexes entre de nombreux processus, dont aucun ne peut à lui seul expliquer une telle variabilité climatique. Certaines recherches soutiennent l'idée qu'une partie de la sécheresse au Sahel peut être attribuée à la différence de charge en aérosols entre les deux hémisphères (Baines et Folland, 2007). Les analyses de modélisation ont mis en évidence le

rôle important des températures de surface de la mer dans la régulation des précipitations au Sahel. En effet, la variabilité des précipitations s'explique dans plus d'un tiers des cas par la variabilité de ces températures (Folland et al., 1986 ; Giannini et al., 2003).

Cette situation de sécheresse au Sahel a provoqué des mouvements migratoires, principalement des peuples pasteurs venant du bassin du Lac Tchad, à la recherche de l'eau et des nouveaux pâturages pour leurs troupeaux. Le bassin du fleuve Congo, à cause de son potentiel en ressources en eau et des services écosystémiques qu'il offre, a été l'une des régions ayant été touchées par les flux migratoires. Les migrants qui ont envahi la partie Nord du bassin, particulièrement la partie Nord-Est de la République Démocratique du Congo (RDC) ont accru les pressions sur les différentes ressources naturelles, notamment les ressources en eau. Pourtant la survie de plusieurs communautés de cette région du bassin ne repose que sur des activités dépendant nécessairement des ressources en eau, à savoir l'agriculture, la pêche, l'élevage et la navigation, et la plupart de ces activités dépendent de la variabilité saisonnière des éléments du climat telle que la pluie.

Comparativement à d'autres régions où plusieurs études ont été menées, des incertitudes pèsent encore sur l'évolution attendue du climat de l'Afrique centrale, et notamment des précipitations, en réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre (Mkankam Kamga 2000 ; Hulme et al. 2001 ; GIEC 2007). Dans la région du bassin du fleuve Congo par exemple, il est prouvé qu'elle subit les effets du changement climatique malgré le fait que la région soit largement caractérisée par de nombreuses ressources en eau et une importante biodiversité. Des rapports récents font état de l'évolution croissante de la sécheresse dans le bassin (Hua et al., 2016, Zhou et al., 2014). Évaluer les modalités des éventuels changements climatiques qui affectent (ou affecteront) la sous-région suppose dans tous les cas une connaissance préalable du fonctionnement du climat actuel, particulièrement son incorporation dans les variations et changements climatiques qui affectent la zone tropicale, tout en ayant un regard sur le système climatique planétaire.

La compréhension des impacts de la variation des facteurs climatiques de la zone d'étude est nécessaire pour prévoir les conséquences et les implications sur les ressources en eau et les services écosystémiques dans un contexte de pressions anthropiques, notamment celles liées aux mouvements des migrants et aux conflits qui en résultent.

QUESTIONS DE RECHERCHE

- Quels sont les modes de distribution des facteurs hydroclimatiques dans la zone d'étude ?
- Quelles sont les tendances pluviométriques susceptibles d'avoir des conséquences spatio-temporelles sur les ressources en eau dans les deux bassins ?

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

a. Objectif Général

Améliorer les connaissances sur les facteurs hydro-climatiques et leurs impacts sur la survie des communautés établies dans la région d'étude, particulièrement celles des provinces de Bas-Uélé, Haut-Uélé et Ituri.

b. Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, cette étude se veut d'atteindre les objectifs ci-après :

- Caractériser la variabilité climatique par l'identification des modes de distribution des facteurs hydroclimatiques, notamment les paramètres de détection de ruptures de stationnarité, les tendances ainsi que les indices de variabilité ;
- Analyser les tendances pluviométriques susceptibles d'avoir des impacts positifs ou négatifs sur les ressources en eau et les activités humaines dans la région d'étude ;
- Analyser les fluctuations futures des facteurs climatiques en vue de prévoir les conséquences et les implications sur les ressources en eau et les services écosystémiques dans un contexte de pressions anthropiques.

HYPOTHÈSES

Cette étude a comme hypothèses :

- La variabilité climatique se manifesterait par une dynamique spatio-temporelle des pluies annuelles et une diminution de la durée des saisons pluvieuses.
- La caractérisation de la variabilité climatique dans le Bassin du Congo permettrait de mieux en établir la cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau.

INTERET DE L'ETUDE

Ce travail fournira les connaissances sur lesquelles pourront s'appuyer les décideurs quant à l'orientation des politiques et l'affectation des ressources en eau dans le contexte de changement climatique, dont les impacts sont d'ailleurs exacerbés par les pressions anthropiques, notamment les vagues des migrants à la recherche de l'eau et du pâturage pour leurs bétails.

SUBDIVISION DU TRAVAIL

Ce travail est subdivisé en trois chapitres, en dehors de l'introduction et de la conclusion :

Chapitre I : Aperçu général sur la variabilité climatique

Chapitre II : Cadre d'étude, Données et Méthodes

Chapitre III : Analyse de la variabilité et tendance climatique dans la zone d'étude

Chapitre IV : Analyse des scénarios de changement climatique

Chapitre I : APERÇU GENERAL SUR LA VARIABILITE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AFRIQUE

1.1. CADRE CONCEPTUEL

Dans le but de dissiper tout malentendu, il est proposé ci-dessous les définitions de quelques concepts qui sont couramment utilisés dans cette étude. Pour de nombreux termes, la définition donnée est celle généralement utilisée dans le contexte des changements climatiques et en particulier par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ou la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Ces termes seront utilisés dans ce mémoire afin de garder le caractère des normes conventionnelles du vocabulaire à des fins de comparaison et de similitude.

Changements climatiques : La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques entend ce concept « des changements du climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, qui modifient la composition de l'atmosphère globale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». Les changements climatiques désignent ainsi une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes (UNFCCC, 1992).

Variabilité climatique : En général, elle se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat. Compte tenu de la difficulté de dissocier variabilités et changements climatiques, en particulier dans le contexte africain, la notion de « variabilité et changement climatique » sera souvent utilisée dans cette étude, afin de mieux refléter la question et d'éviter les interminables et complexes débats. Ainsi, la notion de variabilités et changements climatiques désignera la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit naturelle ou due aux facteurs d'origine anthropique (Niasse M., Afouda A. et Amani A., 2004).

Adaptation : C'est un processus d'ajustement des systèmes naturels et humains à un stimulus climatique constaté ou anticipé, à ses effets et ses impacts. Il désigne un changement de procédures, de pratiques et de structures visant à limiter ou supprimer les dommages potentiels ou à tirer bénéfice des opportunités créées par les changements climatiques. Il

induit des ajustements afin de réduire la vulnérabilité au changement climatique de certaines communautés, régions ou activités/secteurs.

Variabilité pluviométrique : Un des éléments intégrateurs de la variabilité climatique, l'expression « variabilité pluviométrique » fait pressentir la mobilité ou la variation du schéma pluviométrique moyen et l'accentuation des valeurs extrêmes à toutes les échelles temporelles et spatiales (Boko, 1988). Autant que possible, elle est analysée par rapport aux valeurs centrales ou médianes des séries plutôt que par rapport aux valeurs moyennes ou normales, qui sous-entendent l'idée de fixité du climat. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique ou à des variations du forçage externe anthropique. Dans ce travail, il s'agit de caractériser les tendances et les cycles.

Tendance : Au sens général, une tendance se traduit par l'évolution probable d'un phénomène au cours d'une longue période. Dans le cas des précipitations, c'est une forme d'inconstance pluviométrique caractérisée par une baisse ou une hausse régulière et unidirectionnelle des valeurs moyennes des précipitations. Selon le Guide des pratiques climatiques de l'OMM (2005), cette variation tend à se maintenir dans un sens déterminé pendant de nombreuses périodes, allant de quelques années à plusieurs décennies.

Vulnérabilité : Définie de manière générale, la vulnérabilité est le degré selon lequel un système est susceptible d'être atteint du fait d'une exposition à des perturbations ou à des stress. Dans le contexte des changements climatiques, la vulnérabilité peut être définie comme le degré selon lequel un système est sensible - ou incapable de faire face - aux effets adverses des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité d'un système est donc fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation et des changements du climat à laquelle il est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation.

1.2. CHANGEMENTS ET VARIABILITES CLIMATIQUES EN AFRIQUE

1.2.1. Etat des connaissances du climat africain

Sur le plan international, il y a actuellement un consensus quant à l'importance de poursuivre l'analyse sur les changements climatiques en Afrique. En ce qui concerne les scientifiques, il leur reste encore d'importants travaux à faire afin de distinguer les aspects « naturels et

cycliques » du changement et de la variabilité des climats africains de ceux dits « anthropiques ». Le problème essentiel pour les populations africaines demeure cependant à savoir comment identifier les vulnérabilités actuelles et futures à ces changements et quelles sont les stratégies d'adaptation à adopter pour atténuer ces vulnérabilités de manière à assurer un développement durable pour l'Afrique. Il conviendra aux décideurs politiques africains d'évaluer les coûts des mesures d'adaptation choisies, de rechercher les financements correspondants et de réaliser les meilleures allocations des ressources financières afin de faire face à ce défi. L'équation n'est pas simple dans un contexte d'incertitude sur l'évolution du climat mondial et régional et sur leurs impacts potentiels sur le plan régional et local en Afrique.

Par ailleurs, le défi qui a souvent été mentionné par de nombreux scientifiques et experts africains porte sur la nécessité d'intégrer dans l'analyse sur les changements climatiques en Afrique l'effet du changement naturel ou anthropique du couvert végétal et de l'utilisation des terres sur le climat régional. Le rôle du changement du couvert végétal sur la modification du climat régional et local a été pris en considération dans les théories des années 1920 et 1930 sur l'empiétement du Sahara et son influence d'assèchement du climat de l'Afrique de l'Ouest. Cela a influencé la décision du gouvernement algérien de se lancer dans un grand projet de reboisement des limites nord du Sahara afin d'arrêter le processus de désertification et de contrer « l'avancée du désert ».

La variabilité importante du climat africain, engendrée par les courants océaniques, d'une part, et l'impact reconnu mais non mesuré du changement du couvert végétal sur le climat, d'autre part, rendent les prévisions et l'établissement de scénarios des changements climatiques en Afrique, basés sur l'émission des gaz à effet de serre (GES), très incertains. Les modèles climatiques généraux (GCM), en simulant les changements des climats africains sur la base de l'accroissement des concentrations de GES, ne tiennent compte que peu du phénomène El Niño et pas du tout du couvert végétal, deux facteurs potentiellement importants pour l'analyse des changements climatiques en Afrique (Hulme et al., 2001).

Dans le rapport Background paper on impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Africa (UNFCCC, 2006), il est reconnu que la variabilité climatique à l'échelle des saisons et à l'échelle des décennies, en Afrique, est parmi les plus élevées dans le monde. Du fait de cette forte amplitude de la variabilité des climats africains et du fait de l'importance continentale,

le système climatique africain a une influence marquée, non seulement sur les régions avoisinantes, mais aussi sur le système climatique planétaire. Les changements du couvert végétal, des régimes hydrologiques, du transport de sable et de poussières vers l'atmosphère ont un impact à grande échelle sur les propriétés de l'atmosphère et contribuent par là même à la variabilité du climat de la région.

La situation relative à la disponibilité des données et des observations climatiques est actuellement critique et pose problème. Comparativement à d'autres régions du monde, la compréhension scientifique des systèmes climatiques africains est considérée comme faible (Washington et al., 2004). Le niveau de compréhension diffère d'une région à une autre, et est particulièrement faible pour le bassin du Congo qui représente une composante des plus importantes pour le climat mondial et régional. Le besoin pressant en données climatiques sur l'Afrique a été relevé dans le rapport du Plan d'action 2005 des pays du G8, élaboré au sommet de Gleneagles, en mentionnant : « Le manque de données pour l'Afrique est le plus important parmi les continents et requiert un effort immédiat ».

Malgré la disponibilité croissante des données climatiques et environnementales à partir de la télédétection par satellite et malgré les notables améliorations quant à la compréhension, à la capacité de surveillance et à la modélisation du système mondial climatique, les systèmes d'observations au sol et au niveau des couches atmosphériques supérieures en Afrique n'existent toujours pas. Le manque flagrant de données climatiques est reconnu comme une contrainte importante dans la compréhension de la variabilité climatique actuelle et future du continent (DFID, 2004). Si des progrès ont été parfois réalisés en matière de prévision saisonnière, des écarts significatifs apparaissent par rapport au faible réseau de surface dans le bassin du Congo, au Soudan, au Sahel, et dans bien d'autres régions africaines. Les études diagnostiques régionales qui peuvent permettre l'identification des structures des années sèches et humides, leurs indicateurs et leurs impacts aux moyens de techniques statistiques et empiriques seraient utiles en Afrique. La coordination des efforts quant au renforcement des capacités de formation, de recherche et de développement permettrait l'amélioration du suivi et de la surveillance climatique et environnementale à l'échelle continentale en Afrique. Cela permettrait de rendre disponibles des données fiables qui seraient traitées pour l'ensemble des utilisateurs et décideurs.

Le Système mondial d'observation du climat (GCOS), créé en 1992, n'a réellement retenu l'attention de la Conférence des Parties (COP) que vers 1998, lors du processus lancé par la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), car un besoin pressant se faisait sentir pour améliorer la qualité des données climatiques, particulièrement dans les pays en développement. La COP et ses agences ont mis en œuvre un certain nombre de décisions afin de pallier ce problème et d'améliorer les réseaux d'observation. Deux ateliers régionaux ont été réalisés ; l'un pour les pays de l'Afrique de l'Est et du Sud et le second pour ceux de l'Afrique centrale et de l'Ouest. Ces deux ateliers ont conduit au développement de deux plans d'action régionaux pour améliorer les composantes du système d'observation mondial (Global Climate Observing System, GCOS4) dans la région de l'Afrique de l'Est et du Sud, tels les systèmes d'observation de la surface (GSN) et de l'atmosphère (GUAN). Selon les experts de l'Afrique, les opérations de ces deux composantes du GCOS ne sont pas encore pleinement satisfaisantes. En 2003, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) rapporte que 26 % des 84 stations du GSN et 20 % des 10 stations du GUAN sont silencieuses en Afrique de l'Est et du Sud. Le reste des stations ne fonctionne pas correctement. La mise à niveau des réseaux nationaux, pour les seules régions africaines considérées, requiert plus de 200 stations météo automatiques pour l'observation des phénomènes spécifiques liés à la sécheresse et aux inondations.

Par ailleurs, la faiblesse du réseau de l'OMM, le World Weather Watch, est due entre autres à la faible densité de stations. Il existe, en Afrique, 1152 stations qui sont en charge de fournir des données climatiques en temps réel, ce qui représente une station pour 26 000 km², une densité huit fois plus faible que le minimum recommandé par l'OMM. De vastes régions en Afrique du Nord, en région sahélienne Est et en Afrique centrale ne sont pas couvertes et octroient à l'Afrique le plus faible taux d'observation de toutes les régions du monde (Washington et al., 2004). La faiblesse des observations climatiques et de la couverture spatiale des points hauts et culminants, tels le mont Kenya et le mont Kilimandjaro, en regard de la couverture de neige, de glaciers et du ruissellement des eaux, ne permet pas de faire le point sur les impacts à long terme des changements climatiques (GCOS, 2002). Des études démontrent la rapide réduction de la couverture de neige et de glace au cours des cinquante dernières années et leur possible disparition totale d'ici 2100 (UNEP, 2002).

1.2.2. Variabilité climatique dans la région intertropicale : éléments majeurs de la circulation atmosphérique

Dans la région intertropicale africaine, les précipitations se caractérisent par une rapide diminution des cumuls à mesure que l'on s'éloigne des régions équatoriales. Cette diminution s'établit dans le sens sud-nord. La direction de ce gradient s'explique par la localisation des anticyclones tropicaux, entre lesquels s'étire la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) (Ardoin-Bardin, 2004). La ZCIT constitue donc un axe de symétrie vers lequel convergent les flux tropicaux (alizés). L'élément majeur de la circulation atmosphérique au-dessus de ces régions est la mousson, caractérisée par un renversement saisonnier des vents. Le dynamisme de cette circulation tropicale est lié aux processus extratropicaux (rétroactions au sein du système Terre-Océans-Atmosphère dans différentes gammes de fréquences) et aux mouvements apparents du soleil, déplaçant la ZCIT suivant les saisons (Ardoin-Bardin, 2004).

1.2.2.1. Les alizés

Les alizés sont des vents d'est de basses latitudes, lents et constants, dont la circulation est entièrement comprise dans le même hémisphère géographique. Ils proviennent des bordures orientales des anticyclones dont la rotation commande la vitesse et le sens d'écoulement des alizés. Se distinguent en fonction de la trajectoire suivie :

- L'alizé maritime provient d'un anticyclone océanique. Il se réchauffe lentement et s'humidifie constamment atteignant la saturation en fin de parcours. En Afrique occidentale, les alizés maritimes, stables et de secteur sud-ouest à sud, proviennent de l'anticyclone de Sainte-Hélène ;
- L'alizé continental se réchauffe plus rapidement et son déficit de saturation augmente dans les mêmes proportions, sa forte capacité évaporatrice n'étant pas satisfaite. En Afrique occidentale, l'alizé continental ou harmattan est issu de l'anticyclone saharo-méditerranéenne. Son air polaire initial se tropicalise et il devient instable en survolant le Sahara. C'est un vent chaud et sec de secteur nord-est à nord.

1.2.2.2. La mousson

Du point de vue strictement aérologique, le flux de mousson résulte de la déviation des alizés par la force de Coriolis après avoir franchi l'équateur. En première approximation, les deux facteurs responsables de la circulation de mousson sont d'une part les variations saisonnières de radiation solaire incidente et d'autre part la répartition des océans et des continents. Si l'hémisphère sud est sous influence permanente de hautes pressions dynamiques (anticyclone de Sainte Hélène), les régions du nord sont dominées, en hiver boréal, par des hautes pressions (anticyclone thermique de Libye), et en été boréal, par des basses pressions thermiques pelliculaires. La mise en place de la mousson est une réponse à ces gradients interhémisphériques de pression et de température.

La transformation d'un alizé en mousson modifie la direction mais ne change pas dans l'immédiat les caractères thermiques et hydriques du flux. Ceci a pour conséquence le transfert d'humidité océanique vers l'intérieur des terres. Ce sont les caractéristiques hygrothermiques de la mousson qui lui ont valu le qualificatif de vecteur de pluie. En Afrique occidentale, où le continent fait face à l'Atlantique sud, le déplacement zénithal n'est respecté qu'en été boréal : la mousson atlantique remonte vers les dépressions sahariennes. Ce flux est permanent sur le sud de l'Afrique occidentale et sur la cuvette congolaise. Sur le continent, la mousson devient un flux peu épais, qui se réchauffe et se dessèche devenant inapte à provoquer les pluies.

1.2.2.3. La Zone de Convergence Intertropicale

Au centre de la zone des basses pressions intertropicales, au contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères, se trouve la ZCIT. Elle se caractérise par des mouvements ascendants engendrant le développement de nuages convectifs pluvio-gènes. La structure de la ZCIT varie selon les régions et les saisons. En Afrique de l'Ouest elle prend plutôt une forme linéaire et adopte une forte pente, si bien que la localisation du maximum de nébulosité et des précipitations ne coïncident pas avec la position en surface de la zone de convergence des flux. La limite entre l'alizé continental et la mousson se nomme Front Intertropical (FIT). Le terme ZCIT désigne soit la trace au sol du FIT, soit l'alignement

zonal de nuages convectifs à fort développement vertical (cumulo-nimbus) observés par satellite sur le domaine océanique.

1.2.2.4. Circulation atmosphérique et conditions hydroclimatiques

La circulation atmosphérique tropicale a une apparence simple : convergence des alizés vers la ZCIT, convection, reprise de l'air en altitude vers les hautes pressions tropicales. Mais elle est en réalité bien plus complexe, si l'on prend en compte les variations d'intensité des courants-jets, connus sous les noms de JEA et de JET, ou encore d'une "présumée cellule de Walker" (Leroux, 1995), et plus encore si l'on tient compte des relations océan-atmosphère avec les températures de surface marines et les événements El Niño ou La Nina, phénomènes largement étudiés par ailleurs (Nicholson et Entekhabi, 1986 et 1987 ; Nicholson et Nyenzib, 1990 ; Moron et al., 1995 ; Nicholson et Kim, 1997 ; Ward et al., 1999).

Le flux de mousson, et ses variations saisonnières qui en résultent, commande les conditions climatiques autour du Golfe de Guinée. Or, les facteurs climatiques jouent un rôle essentiel dans la genèse des précipitations, et donc, de l'écoulement fluvial. En effet, ce sont les précipitations, qui par leur abondance, leur variations saisonnières et leur irrégularité interannuelle régissent les régimes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Centrale. La connaissance des mécanismes climatiques à l'origine du flux de mousson permet de mieux appréhender les variations hydroclimatiques à l'échelle continentale avant d'améliorer les connaissances sur la variabilité des précipitations et des débits à l'échelle des bassins versants (Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet et al., 1997 ; Paturel et al., 1997b ; Servat et al., 1997a ; Olivry et al., 1998 ; Laraque et al., 2001).

1.2.3. Changements climatiques en Afrique

En se fondant sur les informations scientifiques les plus récentes fournies par le troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), publié en 2001, et sur d'autres données examinées par un groupe de conseil scientifique, le Programme des Nations unies pour l'environnement et son centre associé GRID-Arendal ont présenté des graphiques climatiques cruciaux pour l'Afrique, au titre d'efforts spéciaux qui visaient à offrir une information scientifique pouvant être facilement comprise par tous les décideurs politiques en Afrique.

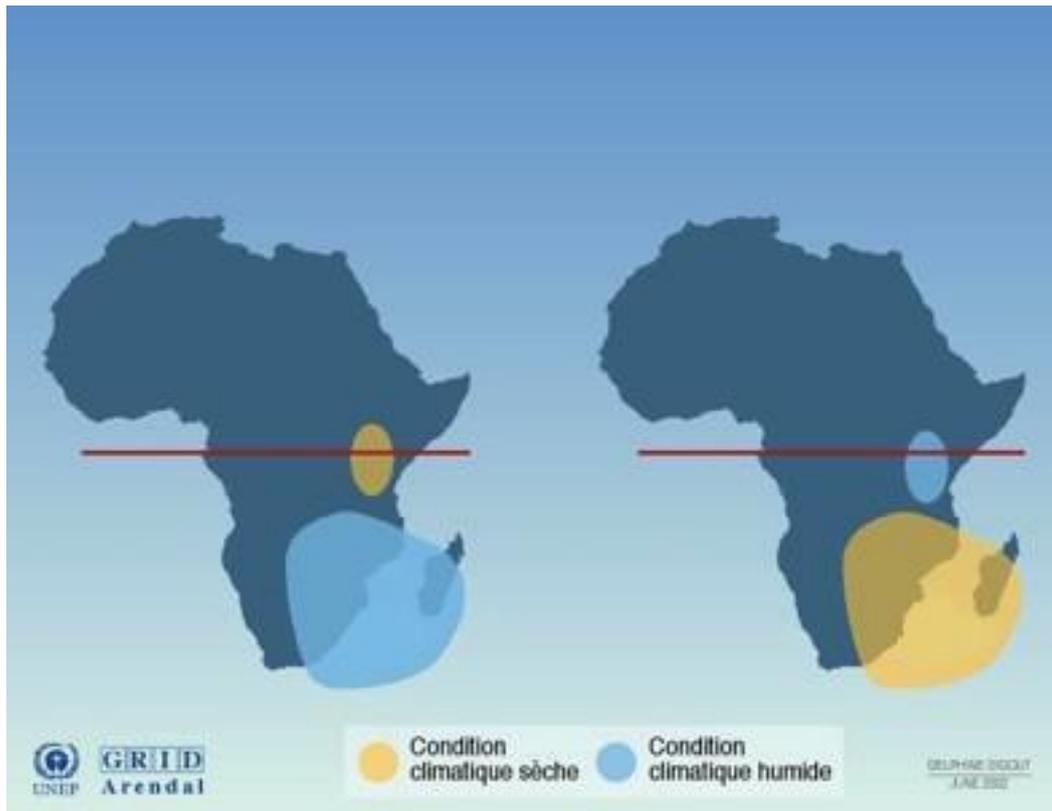


Figure 1 : Oscillation d'El Niño en Afrique australe et de l'Est (Source : Centre de Prédiction Climatique NCEP)

L'anomalie pluvieuse typique, associée à l'oscillation australe El Niño (ENSO) (figure 10), suit un modèle de précipitations dipolaire : l'Afrique orientale est en phase avec les épisodes chauds d'ENSO alors que l'Afrique australe y est négativement reliée. La variabilité interannuelle du climat africain est déterminée par plusieurs facteurs. L'oscillation australe El Niño (ENSO) représente la principale perturbation de la variabilité climatique interannuelle d'Afrique orientale et australe. En 1997-1998, le phénomène ENSO a entraîné des conditions de pluviométrie extrême sur l'Afrique orientale, alors qu'en 1999-2000 La Niña pourrait être responsable des inondations dévastatrices au Mozambique. Les épisodes de réchauffement du phénomène El Niño, qui affectent régulièrement les variations régionales des précipitations et des températures dans la plupart des zones tropicales et subtropicales, et dans certaines zones de moyenne latitude, ont été plus fréquents, plus persistants et plus intenses depuis le milieu des années 70 qu'au cours des 100 dernières années. (IPCC, 2001)

1.2.3.1. Changements observés des températures

En se basant sur des enregistrements historiques, le troisième rapport du GIEC (IPCC, 2001) révèle une augmentation des températures de près de 0,7 degré sur tout le continent africain durant le XXe siècle. Les enregistrements révèlent aussi que cet accroissement des températures s'est réalisé au rythme de 0,05 degré par décennie et que le réchauffement a eu lieu surtout durant la période de juin à novembre (Hulme, 2001). Les années les plus chaudes ont eu lieu depuis 1988, avec les années 1995 et 1998 aux extrêmes les plus élevés (Hulme et al., 2001).

1.2.3.2. Changements observés des précipitations

Une réduction en moyenne de 25 % des précipitations a été observée, au niveau de la zone du Sahel, pendant les 30 dernières années. Ce changement s'est caractérisé par une diminution du nombre d'événements pluvieux. Cette réduction des précipitations a eu lieu durant le XXe siècle, particulièrement après les années 1960, dans les zones subtropicales et tropicales, depuis l'Afrique jusqu'en Indonésie (IPCC, 2001). Hulme et al. (2001) ont révélé une diminution des précipitations de $2,4 \pm 1,3$ % par décennie dans les régions des forêts tropicales en Afrique, depuis les années 1975. Le taux de diminution a été plus important en Afrique de l'Ouest ($-4,2 \pm 1,2$ % par décennie) et au nord du Congo ($-3,2 \pm 2,2$ % par décennie).

1.2.3.3. Les changements observés des événements extrêmes

L'Afrique connaît régulièrement des événements graves tels que les sécheresses, les inondations, les épidémies, la pénurie d'eau et la crise alimentaire récurrente, événements dus à la combinaison du changement et de la variabilité climatique et à l'importante vulnérabilité aux impacts négatifs de ces changements.

Les INONDATIONS : elles sont récurrentes dans certaines régions africaines. Même les communautés vivant dans des régions sèches ont parfois été affectées. Les années 2000-2001 ont été marquées par les graves inondations du Mozambique, particulièrement le long des vallées du Limpopo, du Save et du Zambezi. Plus d'un demi-million de personnes se sont retrouvées sans abri et il y a eu plus de 700 personnes qui ont perdu la vie. Cette inondation a eu des effets dévastateurs sur le bétail, sur les cultures et les récoltes. Les infrastructures de

base telles que les routes, les ponts, les installations d'électricité et les habitations ont été gravement endommagées (UNEP, 2004a). Les événements d'inondation peuvent survenir la même année que des événements de sécheresse. C'est le cas de l'Afrique de l'Est. L'Éthiopie a vécu au début de 2006 une sévère sécheresse qui a été suivie, en août de la même année, de graves inondations à l'est du pays. Ces inondations ont causé la mort de 200 personnes et la disparition de 250 personnes.

Les SECHERESSES : le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD) définit la sécheresse de manière générale comme une diminution de 50 % des précipitations sur une durée de trois mois (PNUD, 2006). La durée de la sécheresse est un indicateur important pour la caractérisation de ses niveaux de risque et de ses impacts, car elle peut se développer lentement et peut persister sur une période de plusieurs années. Les pays africains sont reconnus pour être les plus vulnérables aux sécheresses. Certaines zones subhumides et semi-arides de l'Afrique du Nord, la région du Sahel africain, située à la frontière sud du Sahara, et qui s'étend de la côte de l'Afrique de l'Ouest jusqu'aux zones hautes de l'Afrique de l'Est, la Corne africaine et l'Afrique du Sud vivent ce genre de situation depuis les années 1960.

La relation forte entre les changements environnementaux, telle la fréquence croissante de la sécheresse au Sahel, et les activités économiques n'est plus à démontrer. Les années sèches consécutives causant des déséquilibres écologiques sur de larges étendues affectent les capacités des populations de faire face à la sécheresse en réduisant leur temps d'adaptation et de préparation entre les événements (Adger, 2002).

Les TEMPETES DE SABLE et de POUSSIÈRE : Le soulèvement de particules de poussière et de sable dans les couches inférieures de l'atmosphère est une des caractéristiques de l'environnement au Sahara et au Sahel. La fréquence des tempêtes de sable et de poussière a augmenté dans certaines régions du Sahel depuis les années humides 1950-1960 jusqu'à la période des années sèches des années 1970-1980 (N'Tchayi et al., 1997, 1997). Au nord du Soudan, le vent puissant humide et chaud, nommé Haboub, se déplace comme un mur d'une centaine de mètres en transportant du sable et des poussières sur de larges étendues. Le Sahara et le Sahel constituent la source principale des poussières atmosphériques dans le monde (Andreae, 1996; D'Almeida, 1986) et, selon certaines estimations, ils contribuent à l'exportation annuelle de près d'un milliard de tonnes de poussières sur de larges distances

vers le nord et les régions adjacentes, déposant ces minéraux en Europe, en Asie de l'Ouest et dans les Amériques (Moulin et al., 1997).

Les impacts du surpâturage, de la déforestation, de la désertification des terres et de la dégradation des sols, créant d'autres sources de poussière, contribuent aussi à l'augmentation des tempêtes de sable et de poussière. La région sahélienne est devenue une source plus importante de poussière que le Sahara (N'Tchayi et al., 1997). Même si les liens entre la désertification et les changements climatiques doivent encore être mieux explorés, la situation pourrait s'aggraver à cause des impacts qu'une réduction des précipitations et un allongement des périodes de sécheresse auraient sur les sols en Afrique. Il est aussi connu que le processus de désertification en Afrique est dû à la surexploitation des terres, à l'agriculture extensive sur les terres arides et, de ce fait, à la pauvreté et à la forte dépendance des populations rurales aux ressources naturelles pour leur subsistance.

1.3. VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La vulnérabilité au changement climatique fait référence à la vulnérabilité aux chocs essentiellement environnementaux liés au changement climatique. Ces chocs sont l'expression du changement climatique et se manifestent par l'augmentation du nombre et de l'intensité des aléas climatiques, notamment les sécheresses, les inondations et tempêtes, ainsi que l'élévation du niveau de la mer pour les régions côtières de faible altitude. Ces chocs se traduisent par la modification des valeurs moyennes des variables climatiques telles que les températures et les précipitations, et par les changements connexes de l'instabilité de ces variables.

1.3.1. Principales approches de vulnérabilité au changement climatique

Lorsque l'on cherche à étudier la vulnérabilité, on se heurte d'emblée à une profusion de définitions, qui finissent par renvoyer à des objets et à des préoccupations très différents. Face à la polysémie dans l'emploi du terme de vulnérabilité, qui souffre d'un trop-plein sémantique puisqu'il évoque aussi bien la dépendance ou la fragilité, la centralité, l'absence de régulation efficace, le gigantisme ou la faible résilience, il semble essentiel de pouvoir en clarifier les différentes acceptions. Toutefois, avant de retracer les significations et les emplois du terme de vulnérabilité dans le langage scientifique des risques naturels et du changement climatique

(comme risque anthropogénique), il convient d'en rappeler l'usage dans le langage courant dans la mesure où l'emploi qui en est fait dans le langage académique en découle.

1.3.1.1. Approche chronologique (ex post vs ex ante)

Il s'agit de l'analyse séquentielle d'un choc (relatif au changement climatique) qui compare la situation avant et après ce choc. Kelly et Adger (2000) adoptent cette approche en définissant une vulnérabilité au point de départ et une vulnérabilité au point final. Ils définissent la "vulnérabilité du point de départ" comme l'ensemble des éléments de l'environnement qui aggravent ex ante les conséquences des chocs. Cette vulnérabilité est liée aux conditions sociales et économiques, ainsi qu'aux caractéristiques politiques et institutionnelles. La "vulnérabilité finale" résulte des conséquences du changement climatique. Elle est saisie par une évaluation des pertes dues au choc, en fonction de ses caractéristiques et de son ampleur. O'Brien et ses collaborateurs (2007) utilisent une distinction similaire. Les auteurs traitent de la vulnérabilité des résultats et de la vulnérabilité contextuelle dont les définitions sont proches de la vulnérabilité du point final et du point de départ de Kelly et Adger (2000). Une distinction similaire est également faite dans le glossaire du dernier rapport du groupe de travail II du GIEC (2014), qui regroupe la vulnérabilité des résultats et la vulnérabilité du point final d'une part, et la vulnérabilité contextuelle et la vulnérabilité du point de départ d'autre part.

1.3.1.2. Approche oignon

Ce que l'on peut appeler une approche oignon consiste à élaborer un concept de vulnérabilité qui s'étend progressivement. L'objectif de cette approche est de rendre la définition de la vulnérabilité progressivement plus complexe selon différentes échelles (souvent géographiques). Ce type d'analyse est proposé par Bogardi et Birkmann (2004) et développé dans Birkmann (2007). L'auteur considère que le cœur de la vulnérabilité est la vulnérabilité intrinsèque. Il introduit un continuum de définitions de la vulnérabilité allant de la définition la plus étroite à la plus large : "vulnérabilité multidimensionnelle englobant des caractéristiques physiques, sociales, économiques, environnementales et institutionnelles" (Birkmann 2006).

1.3.1.3. Approche dichotomique sociale et écologique

Il s'agit d'un cadre qui trouve ses racines dans la littérature écologique. Adger et ses collaborateurs (2004) distinguent une vulnérabilité biophysique de la vulnérabilité sociale. Cette distinction est proche de celle présentée par Brooks (2003) qui identifie deux types de vulnérabilité au changement climatique dans la littérature. La vulnérabilité biophysique est définie par les spécialistes de l'environnement en termes de dommages physiques causés à un système par un événement ou un danger particulier lié au climat (Nicholls et al. 1999, Jones et Boer 2005) ; la vulnérabilité étant analysée en termes de probabilité d'occurrence et d'impact des événements liés au temps et au climat (Nicholls et al. 1999). L'approche biophysique correspond le plus étroitement à la sensibilité dans le concept et la terminologie du GIEC ; elle est également associée à l'évaluation et à la gestion des risques (Alwang et al., 2001). Le deuxième type de vulnérabilité est défini comme "l'état qui existe au sein d'un système avant qu'il ne rencontre un événement dangereux" (Allen 2003). En ce sens, elle est proche de la "vulnérabilité de départ" de Kelly et Adger (2000). C'est également, selon Brooks, la définition de la vulnérabilité sociale.

La vulnérabilité sociale dépend non seulement de facteurs biophysiques, mais aussi de l'ensemble des facteurs socio-économiques qui déterminent la capacité des personnes à faire face au stress ou au changement (Allen 2003). Elle peut être considérée comme incluant ce que l'on a appelé les facteurs d'exposition et de résilience, qui impliquent à la fois des facteurs structurels et politiques. Cutter et Finch (2008) définissent la vulnérabilité sociale comme une mesure à la fois de la sensibilité d'une population aux aléas naturels et de sa capacité à réagir et à se remettre des effets des aléas. Le Programme des Nations unies pour le développement (2000) la définit comme "... la mesure dans laquelle les sociétés ou les groupes socio-économiques sont affectés par des stress et des aléas, qu'ils soient provoqués par des forces externes ou des facteurs intrinsèques (internes et externes) qui ont un impact négatif sur la cohésion sociale d'un pays" (PNUD, 2000). La distinction faite par Brooks (2003) l'a conduit à regrouper la vulnérabilité sociale et biophysique en un système unique.

1.3.1.4. Approche du GIEC

C'est l'approche qui a le plus d'influence. Le rapport du GIEC (2007) définit la vulnérabilité comme le degré auquel un système est susceptible et incapable de faire face aux effets néfastes du changement climatique (GIEC 2007a, Glossaire). Cette définition est proche de la définition de la vulnérabilité économique présentée précédemment avec les trois composantes qui se chevauchent : choc, exposition et résilience.

Cette approche est reformulée par le Rapport spécial sur la gestion des risques de l'extrême (GIEC, 2012) qui présente une approche de gestion des risques et par le Rapport du deuxième Groupe de Travail du GIEC (GIEC, 2014a). La vulnérabilité est définie comme la propension ou la prédisposition à être affecté négativement. La vulnérabilité englobe une variété de concepts, notamment la sensibilité ou la prédisposition à subir des dommages, et le manque de capacité à faire face et à s'adapter.

1.3.2. Mesure de la vulnérabilité au changement climatique

Bien que plusieurs disciplines conviennent d'accepter une définition commune de la vulnérabilité comme "susceptible de nuisance", l'utilisation du terme change en fonction des disciplines et des secteurs de recherche. Les sociologues considèrent la vulnérabilité d'une population comme représentant l'ensemble des facteurs socio-économiques qui déterminent la capacité à faire face à un désastre (Allen, 2003 ; Cutter et al., 2000), tandis que les sciences du climat perçoivent la vulnérabilité en termes de probabilité d'occurrence d'événements et d'impacts reliés au climat (Nicholls et al., 1999). La première approche synthétique vise donc à cerner les conditions ou les facteurs influant sur la capacité de réponse à une situation de crise, et la deuxième approche consiste à mesurer les dommages potentiels des éléments exposés. Dans cette étude, l'accent n'est mis que sur la mesure des dommages potentiels des éléments de l'environnement. D'où le recours à l'Indice de Vulnérabilité Physique au Changement Climatique.

1.3.2.1. Indice de Vulnérabilité Physique au Changement Climatique

Dans le but de combiner l'allocation de ressources pour la réduction de la pauvreté et l'adaptation au changement climatique de manière cohérente, il est proposé dans cette étude

un indice de vulnérabilité physique au changement climatique (IVPCC) construit sur des principes similaires à ceux de l'indice de vulnérabilité économique des Nations unies. Comme l'indice de vulnérabilité économique capture une vulnérabilité économique "structurelle" et supposée être exogène, l'indice de vulnérabilité au changement climatique devrait capturer une vulnérabilité "physique" au changement climatique et donc exogène. Une telle vulnérabilité au changement climatique, indépendante de la volonté politique actuelle des pays, devrait permettre d'identifier les pays ayant le plus besoin d'aide à l'adaptation, indépendamment de leurs choix politiques, et sera probablement utilisée comme critère pour l'allocation des ressources d'adaptation. Cet indice pourrait ensuite être combiné avec d'autres indicateurs pour déterminer une allocation optimale de ces ressources (Guillaumont,2015b).

La vulnérabilité au changement climatique est une vulnérabilité aux chocs environnementaux résultant du changement climatique. Ces chocs sont ici considérés comme l'expression physique du changement climatique. Ils se manifestent essentiellement par l'augmentation du nombre et de l'intensité des sécheresses, des inondations et des tempêtes, ainsi que par l'élévation du niveau de la mer pour les régions côtières de faible altitude. Ils se traduisent par la modification des valeurs moyennes des variables climatiques (telles que la température ou les précipitations), et par les changements connexes de l'instabilité de ces variables. Donc, l'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique qui est proposée ici est donc axée sur la vulnérabilité qui dépend uniquement de facteurs physiques, facteurs qui ne dépendent pas de la volonté ou des politiques des pays, et qui sont essentiellement géophysiques.

Pour identifier la vulnérabilité structurelle ou physique au changement climatique, il est utile de se référer aux trois composantes habituelles de la vulnérabilité économique (taille des chocs, exposition aux chocs, résilience), et de considérer que la vulnérabilité structurelle est principalement captée par les composantes choc et exposition, tandis que la résilience est davantage liée à la politique ou à d'autres variables susceptibles d'être considérées séparément comme le niveau de revenu par habitant.

1.4. SCENARIOS FUTURES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les scénarios climatiques peuvent fournir des informations importantes sur l'évolution du climat d'une région donnée. Avec ces informations, il est possible de nos jours de prévenir les

impacts négatifs potentiels du changement climatique tout en promouvant un développement résilient au climat et à faible émission. Mais la prévision du climat régional (c'est-à-dire le schéma météorologique moyen sur une période donnée - par exemple 30 ans) est une science incertaine (PNUD, 2011). Il existe de nombreuses méthodes qui peuvent produire des scénarios plausibles. Certaines ne fournissent que des résultats à faible résolution (ou grossiers), alors que d'autres donnent des résultats à haute résolution (p. ex. les méthodes de réduction d'échelle).

1.4.1. Principes de base de la modélisation climatique

Pour représenter tous les processus du système climatique, les scientifiques ont développé des modèles climatiques qui sont des outils numériques basés sur des équations mathématiques qui prennent en compte les principes fondamentaux de conservation de la masse, de l'énergie, de l'eau et de la quantité de mouvement (Ly M. et al., 2019). Ces équations, donc les modèles climatiques, décrivent le comportement et les interactions entre les différentes composantes du système climatique (l'atmosphère, les océans, les fleuves, le sol, etc.) sous des forçages externes tels que la radiation solaire, les aérosols, ainsi que les émissions naturelles et anthropiques de gaz à effet de serre (GES).

Les principales composantes du système climatique traitées dans un modèle climatique sont les suivantes :

- La composante atmosphérique : qui simule les nuages et les aérosols, et joue un rôle important dans le transport de la chaleur et de l'eau autour du globe ;
- La composante surface terrestre : qui simule les caractéristiques de surface telles que la végétation, la couverture neigeuse, l'eau du sol, les rivières et le stockage du carbone ;
- La composante océanique, qui simule le mouvement et le mélange des courants, ainsi que la biogéochimie, puisque l'océan est le réservoir dominant de chaleur et de carbone dans le système climatique ;
- La composante glace de mer, qui module l'absorption du rayonnement solaire et les échanges air-mer de chaleur et d'eau.

Pour la modélisation, le globe est divisé en une grille tridimensionnelle de cellules représentant des emplacements géographiques et des élévations spécifiques. Pour chacune des composantes (atmosphère, surface terrestre, océan et glace de mer), des équations sont calculées sur la grille mondiale pour un ensemble de variables climatiques telles que la température, précipitations, etc. Outre le fait que les composantes du modèle calculent leur évolution dans le temps, les différentes parties échangent des flux de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement. Elles interagissent les unes avec les autres comme un système couplé.

Dans la modélisation du climat, il existe deux catégories de modèles : les modèles climatiques globaux (GCM) et les modèles climatiques régionaux (RCM). Les techniques dites de descente d'échelle permettent de passer du GCM au RCM en prenant en compte de manière plus fine l'effet de l'orographie, qui n'est pas assez sensible avec les modèles globaux pour une région donnée (Ly M. et al., 2019). Le modèle régional est obtenu en forçant les conditions aux limites régionales par un modèle global, ce qui permet de prendre en compte, au niveau régional, les informations sur la circulation générale de l'atmosphère, l'influence des températures de surface des océans.

Bien qu'il existe un certain niveau de désaccord entre les modèles climatiques, ces modèles sont basés sur des principes physiques bien fondés, soit directement pour les processus simulés, soit indirectement pour les processus paramétrés. Les résultats d'une expérience sont largement vérifiés par une grande communauté de modélisateurs et de chercheurs dans le monde (par exemple, dans le cadre du GIEC), ce qui réduit l'incertitude (Heinzeller et al., 2018). En général, les modèles produisent des simulations des climats actuels et passés à grande échelle qui concordent avec les observations. Les modèles climatiques ont également produit des prévisions rétrospectives précises du changement climatique du 20^e siècle, y compris un réchauffement accru dû en partie aux émissions de CO₂. Cela nous donne confiance dans l'utilisation de ces modèles pour prévoir les changements climatiques futurs (Kyle L. et al., 2009).

Le premier modèle atmosphérique date de 1950, et au moment de la rédaction du 4^{ème} rapport du GIEC de 2007, le nombre de modèles indépendants utilisés par les laboratoires climatiques du monde entier était de 23. La complexité de modèles varie selon les différents

types. Les plus simples donnent une très bonne compréhension de ce qui se passe ; les plus complexes permettent d'approcher la réalité.

1.4.2. Scénarios de changement climatique

De nombreux facteurs doivent être pris en compte lorsqu'on essaie de prédire comment le réchauffement planétaire futur contribuera au changement climatique. La quantité d'émissions futures de gaz à effet de serre est une variable clé (Ly M. et al., 2019). Il faut également tenir compte de l'évolution des technologies, des changements dans la production d'énergie et l'utilisation des sols, de la situation économique mondiale et régionale et de la croissance démographique (Baek, HJ., 2013).

Pour que les recherches des différents groupes soient complémentaires et comparables, un ensemble standard de scénarios est utilisé pour garantir que les conditions de départ, les données historiques et les projections sont employées de manière cohérente dans les différentes branches de la science du climat.

Les conclusions du cinquième rapport d'évaluation (AR5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont été fondées sur une nouvelle série de scénarios qui remplacent les normes du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) utilisées dans les deux rapports précédents (GIEC, 2014). Les nouveaux scénarios sont appelés "voies de concentration représentatives" (Representative Concentration Pathways – RCP). Ce rapport présente quatre voies : RCP8.5, RCP6, RCP4.5 et RCP2.6 (le dernier est également appelé RCP3-PD. PD signifie Peak and Decline). Les chiffres font référence au niveau de forçage radiatif ($W.m^{-2}$) autour de l'année 2100 relatif à chaque RCP (rayonnement descendant moins rayonnement montant). Pour projeter le climat dans le futur, le forçage climatique est réglé pour changer en fonction d'un scénario futur possible.

Les scénarios sont donc des trajectoires prescrites pour les concentrations de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, ainsi que pour le changement d'affectation des terres, qui sont compatibles avec un ensemble de résultats climatiques généraux utilisés par la communauté des modélisateurs du climat (Baek, HJ., 2013). Ils tiennent donc compte du rythme de croissance de la population humaine, l'utilisation des terres, l'évolution des économies et les

conditions atmosphériques (et donc le forçage climatique) qui en résulteraient pour chaque scénario.

Pour les climats passé et présent, les forçages de GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, etc.) sont issus des observations de différentes stations dans le monde entier. Pour le climat futur, l'évolution des GES est obtenue à partir de scénarios d'émissions. Ces scénarios décrivent les changements futurs des concentrations et émissions de GES, des aérosols et autres gaz anthropiques dans l'atmosphère (Ly M. et al., 2019).

Divers scénarios de RCP peuvent être utilisés comme entrée pour les modèles climatiques : un scénario strict d'atténuation (RCP2,6), deux scénarios intermédiaires (RCP4,5 et RCP6,0) et un scénario prévoyant des émissions de GES très élevées (RCP8,5) (Moss et al., 2010 ; Meinshausen et al., 2011). Les projections des modèles climatiques résumées dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC indiquent qu'au cours du 21^e siècle, la température à la surface du globe devrait encore augmenter de 0,3 à 1,7 °C dans un scénario modéré, ou de 2,6 à 4,8 °C dans un scénario extrême, en fonction des futures émissions de gaz à effet de serre et de la réaction climatique. Les scénarios d'émissions sont ainsi combinés avec la modélisation du cycle du carbone pour prédire comment les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre pourraient évoluer à l'avenir. Selon ces modèles combinés, d'ici 2100, la concentration atmosphérique de CO₂ pourrait être de 380 ppm comme de 1 400 ppm, selon le scénario socio-économique et le scénario d'atténuation.

La figure 2 ci-dessous présente le niveau de forçage radiatif relatif à chaque RCP.

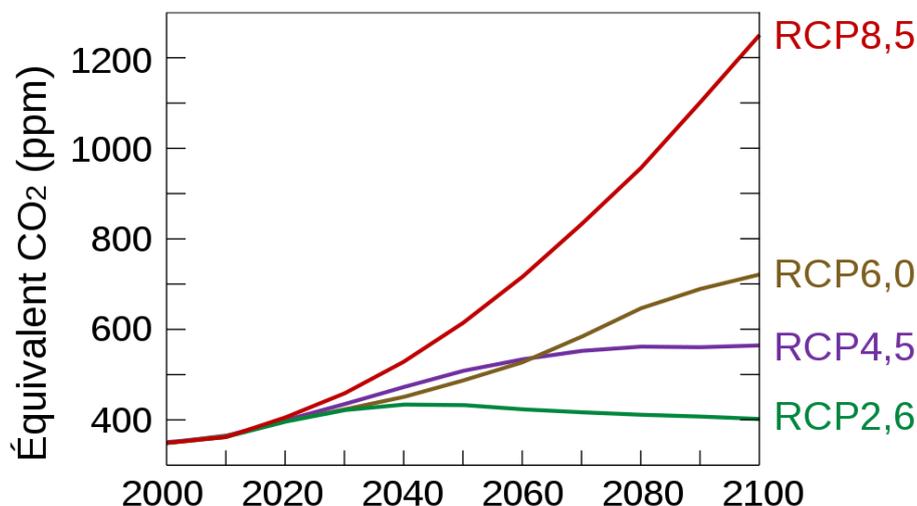


Figure 2 : Voies de concentrations représentatives du GIEC (Source : GIEC, 2014)

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques principales des différents scénarios RCP du GIEC.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Source : Moss et al, 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissante
RCP 6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.	5 ~4,5Wm ⁻² au niveau déstabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Ce tableau révèle que le scénario RCP8.5 demeure le scénario le plus extrême avec des valeurs de forçage radiatif dépassant le 8,5Wm⁻² en 2100, soit près de 1400 ppm de concentration de CO₂. Le RCP2.6 est un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage radiatif très bas. Les deux scénarios de stabilisation sont le RCP4.5 et RCP6.0.

2.1.2. Caractéristiques climatiques

Sur la plan climatique, la zone d'étude est à cheval sur deux grandes régions géographiques, à savoir : l'Afrique centrale et le Sahel, et chacune de ces régions connaît un régime climatique particulier, ce qui explique la diversité climatique importante qui est observée sur l'aire étudiée. La figure 4 présente la classification climatique des différentes régions sur lesquelles s'étend la zone d'étude.

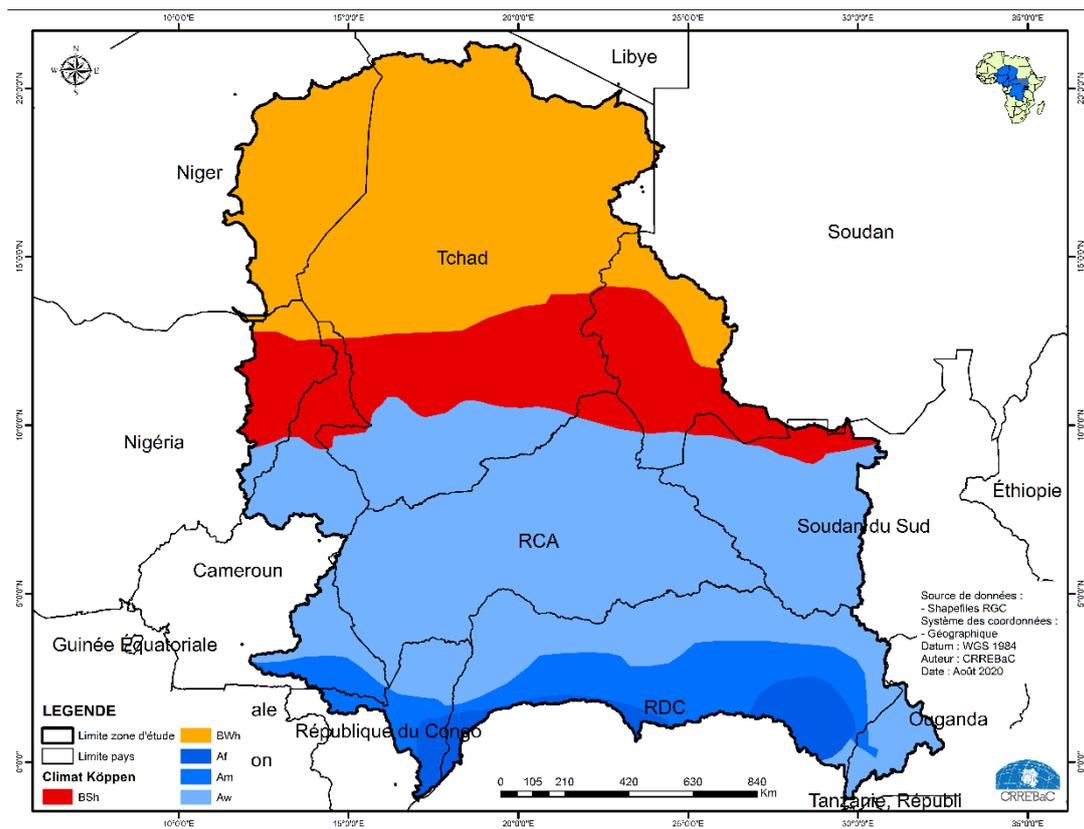


Figure 4 : Classification climatique selon le système Köppen- Geiger où Af = équatorial/humide, Am = tropical/mousson, Aw = tropical/sec, BSh = semi-aride/chaud, BWh = aride/chaud, Cwa = tempéré chaud/hiver sec/été chaud, et Cwb = tempéré chaud/hiver sec/été tempéré.

Le climat de l'Afrique centrale présente une situation climatique très diversifiée pouvant être regroupée en deux types principaux : climat équatorial et climat tropical. Toutefois, certaines

régions d'altitude, d'étendue limitée, sont aussi soumises à des climats de montagne. C'est le cas du rift Albert (à l'Est de la RDC), ou le long de la ligne volcanique du Cameroun.

Le climat équatorial ne comporte qu'une seule saison, et est caractérisé par de fortes précipitations dont les maximums d'intensité sont aux équinoxes. L'humidité y est aussi constante au cours de l'année. Les précipitations sont importantes (de 2000 à 2400 mm) avec deux maxima peu après les équinoxes, qui sont dus au passage du soleil au zénith (Mpounza et Samba-Kimbata, 1990). Il existe trois périodes de forte pluviosité, soit de Mars à Mai, de Juillet à Septembre et d'Octobre à Décembre (Tsalefac et al., 2015). La durée de la saison des pluies varie fortement entre le littoral (plus de huit mois) et la zone désertique qui occupe le Nord de la sous-région (nombre de mois de pluies). Ces pluies sont dues à la convergence des masses d'air poussées par les vents alizés. Cette convergence se fait dans le front intertropical qui se déplace progressivement de part et d'autre de l'équateur au cours de l'année. Les moyennes de température oscillent entre 22°C et 30°C (Mpounza et Samba-Kimbata, 1990). Sous ce climat, la végétation naturelle est la forêt dense. Elle est composée de nombreux arbres, dont certains peuvent atteindre 60 mètres de hauteur. La forêt du Bassin du Congo, constitue la deuxième plus vaste forêt tropicale de la planète après l'Amazonie.

Quant à la région du Sahel, qui est une zone de transition située entre le désert du Sahara et les régions humides de l'Afrique tropicale, le processus prépondérant qui régit le climat de cette région est le système de la mousson de l'Afrique de l'Ouest, vaste schéma de circulation saisonnier à basse altitude généré par le gradient d'énergie statique sèche et humide de la couche limite méridionale entre le continent subsaharien chaud et généralement sec et l'océan Atlantique tropical. Ce système, qui se met en place d'Avril à Octobre, entraîne une migration de la zone de convergence intertropicale, et de la pluviosité maximale qui y est associée, vers sa localisation la plus septentrionale en Août. La variabilité intra-saisonnière de la mousson de l'Afrique de l'Ouest a été attribuée à plusieurs facteurs, notamment la dépression de mousson qui se dirige vers l'Ouest (Grotsky et Carton, 2001), les interactions avec l'orographie locale (Dobriniski et al., 2005), la dynamique de la dépression thermique saharienne (Sultan et Janicot, 2003 ; Sijikumar et al., 2006) et l'albédo de la surface du sol (Ramel et al., 2006).

A l'échelle interannuelle ou décennale, on sait que diverses anomalies causées, aux niveaux régional et planétaire, par les températures de surface de la mer influent sur les précipitations sahéliennes. Il s'agit par exemple des écarts de ces températures entre les hémisphères et des anomalies dans l'Atlantique tropical dans l'océan Indien, et en Méditerranée. La distribution des précipitations dans la région du Sahel peut grossièrement se diviser en différentes régions homogènes : trois maxima (un le long de la côte ouest, près de 8°N ; un, plus faible, autour du Lac Tchad ; et un dernier, sur le plateau éthiopien occidental) et deux minima dont un centré autour du méridien de Greenwich et un autre autour des 30 – 35°E.

Sur l'échelle interannuelle, l'une des principales caractéristiques observées est la structure bipolaire de la zone, qui associe les conditions sèches du Sahel et les conditions humides de la côte guinéenne (au sud de 10°N) avec la présence d'anomalies causées par les températures de la surface de la mer élevées. L'existence d'une telle structure indique qu'une augmentation des précipitations au Sahel est généralement associée à une diminution des précipitations le long de la côte, et inversement. Cette dualité s'explique apparemment par la variation des températures de la surface de la mer dans le golfe de Guinée : une surface de mer chaude provoque un phénomène de convection en mer, réduisant ainsi la pénétration de la zone de convergence sur le Sahel.

2.1.3. Ressources en eau

Comme indiqué ci-dessus, la zone d'étude se situe à califourchon entre la partie nord du Bassin du fleuve Congo et le Bassin du du Lac Tchad. Afin de travailler à une échelle plus fine tant du point de vue spatial que temporel, ces grands bassins sont découpés en sous-bassins versants.

Bassin du Congo : seule la partie nord du bassin est concernée. Elle est couverte par les sous-bassins des rivières ci-après : l'Oubangui, la Sangha, l'Itimbiri, l'Aruwimi et la Tshuapa.

Le bassin de l'Oubangui a une superficie totale de 643 900 km², dont 39% se situent en RDC, 6 % au Congo, et 55 % en Centrafrique. La rivière principale est l'Oubangui, qui est l'un des principaux tributaires du fleuve Congo. Il prend son nom à la jonction de deux rivières : l'Uele (appelé également Ouellé ou Makoua) et le Mbomou (dit encore Bomu ou Kengou), entre Ouango et Limassa. En ce point, l'Oubangui est à 1 100 km de sa confluence avec le Congo, mais l'ensemble Uele-Oubangui dépasse 2 200 km de longueur. Son débit hydrologique

enregistré depuis 1911 est principalement marqué par une régression persistante des débits (29 % de baisse par rapport à la moyenne des années 1935-2006) correspondant à 13 % de la baisse des précipitations due à la rupture climatique des années 1971 (Nguimalet C.R. et Orange D., 2013). En outre, le cours de l'Oubangui a été partiellement bloqué par un barrage construit en 1989 à Mobaye. Les données de débits moyens journaliers selon les périodes critiques de précipitations, 1955-1969 pour une période "humide" et 1970-2006 pour une période "sèche", ont été analysées conjointement avec les données démographiques, les surfaces cultivées et les types de couverture végétale pour la partie du bassin située en République centrafricaine (82% de la superficie totale) afin d'interpréter les changements enregistrés. Depuis 1911, la période 1970-2006 montre 19% de déficit hydrologique alors que celle de 1955-1969 montre 50% d'excédent hydrologique (Nguimalet et Orange, 2013). Ces tendances marquent des débits moyens maximums interannuels (respectivement -15%, +13%) ainsi que des débits moyens minimums interannuels (respectivement -36%, +41%). La rupture des séries pluviométriques constatée en 1970 est confirmée par le déficit hydrologique des 30 dernières années. Par rapport à 1969-1970, la baisse du débit moyen annuel de l'Oubangui est, en 1970-1971, de l'ordre de 1768 m³/s. Depuis 2000, le déficit est deux fois plus important que dans les décennies précédentes malgré une courte reprise des précipitations. De plus, la sécheresse s'étend et le niveau des basses eaux persiste jusqu'en juillet-août. De plus, vu que l'extension des surfaces cultivées ne représente que 3% dans le bassin de l'Oubangui, elle semble faible pour affecter le ruissellement fluvial. Ainsi, le déficit hydrologique enregistré depuis 1970 est un événement climatique confirmé.

Le bassin de la rivière Aruwimi, avec une superficie d'environ 120 406 km², est compté parmi les plus importants de la partie Nord-Est de la RDC en termes de sa contribution au fleuve Congo. La rivière Aruwimi trouve sa source dans le Nord des savanes de la ligne de partage de la rivière Kibali, non-loin du Lac Albert. Son débit moyen mensuel est estimé à 1515 m³/s au niveau de Banalia. Son cours supérieur porte le nom d'Ituri, et il ne devient Aruwimi qu'à partir de la confluence avec la rivière Nepoko au niveau de la cité de Bomili. En dehors des deux principales rivières précitées, il y a une multitude des rivières de moindre importance formant le réseau hydrographique d'Aruwimi. Ce groupe est constitué notamment des rivières Epulu, Ibina, Lenda, Lokuma, Nava, N'gayu, Shari, Sumate, etc.

Quant au bassin de la rivière Itimbiri, il s'étend sur une superficie d'environ 52 854 km². La rivière Itimbiri traverse les localités de Buta et Aketi, et à son embouchure sur le fleuve est à près de 40 km de la ville de Bumba. Elle a un débit moyen mensuel estimé à 261 m³/s au niveau de la station d'Aketi. Les rivières Rubi, Tele et Likati constituent ses principaux affluents.

La figure 5 ci-dessous présente le réseau hydrographique de la zone d'étude.

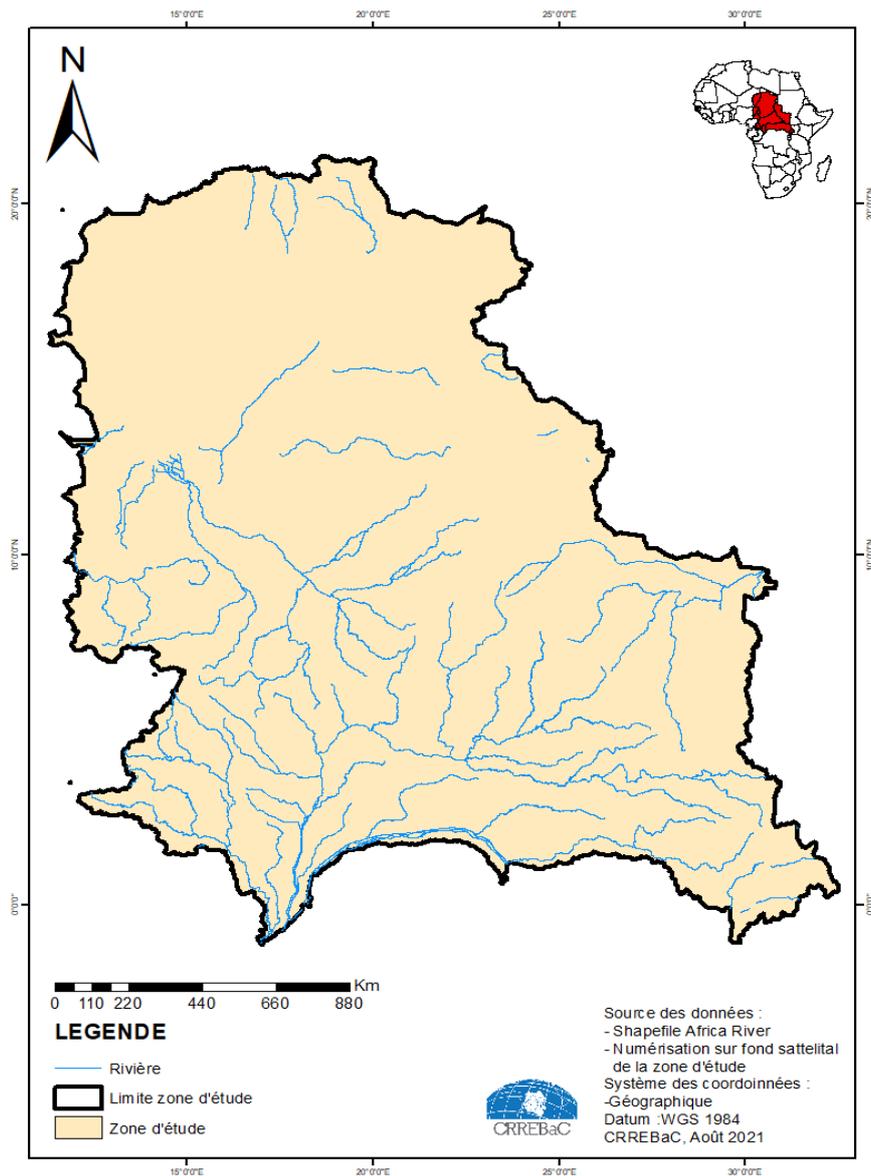


Figure 5 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

Concernant la rivière Sangha, la longueur de son cours est de 790 km. Elle prend sa source au Cameroun, puis traverse la République centrafricaine, et la République du Congo. La rivière s'écoule dans la région d'Afrique couverte par la forêt tropicale humide (forêt du Bassin du

Congo). Elle coule au bord de la ville d'Ouésso et sert au transport fluvial de grumes de bois issues des exploitations forestières du bassin du Congo vers Brazzaville.

Le débit de la rivière a été observé pendant 37 ans (1947-1983) à Ouesso, ville située à quelque 400 kilomètres de sa confluence avec le fleuve Congo. À Ouesso, le débit annuel moyen ou module observé sur cette période a été de 1 662 m³/s pour une surface prise en compte de 158 350 km², soit plus de 70 % du bassin versant de la rivière. La lame d'eau écoulee dans le bassin est de ce fait à 331 millimètres par an, ce qui peut être considéré comme relativement élevé, mais tout à fait normal dans le bassin de cette rivière.

La Sangha est une rivière bien alimentée en toutes saisons et donc assez régulière. Le débit moyen mensuel observé en février-mars, mois d'étiage, atteint 876-878 m³/s, soit quatre fois moins que le débit moyen des mois d'octobre et de novembre (mois des crues), ce qui montre une irrégularité saisonnière réduite. Sur la durée d'observation de 37 ans, le débit mensuel minimal a été de 380 m³/s (mars), tandis que le débit mensuel maximal s'élevait à 4 290 m³/s (novembre).

Bassin du Lac Tchad : Le bassin du lac Tchad se divise en deux principaux sous-bassins hydrologiques :

- Le sous-système du Chari-Logone, qui couvre environ 650 000 km² et comprend la rivière Chari et les plaines d'inondation du Waza-Logone. Il représente environ 95 % du volume annuel d'eau qui se déverse dans le lac.
- Le sous-système du Komadougou Yobé, qui couvre 148 000 km² mais ne représente qu'environ 3 % de l'apport total au lac Tchad.

A ces deux systèmes majeurs s'ajoutent les petits bassins de l'El Beïd, du Yedseram et Ngadda au Nigeria (environ 30 000 km²) situés au sud du Lac.

Le fleuve Chari prend sa source dans les zones montagneuses de la RCA où la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 1500 mm/an. Ce fleuve permanent parcourt la République du Tchad sur environ 800 km. Au cours de son trajet, il fait jonction avec le Logone à N'Djaména et Kousséri, et marque alors la frontière entre le Cameroun et le Tchad. Les eaux du Chari, augmentées du Logone, apportent au Lac près de 90 % de ses apports de surface pour un bassin de l'ordre de 610 000 km² (Dieulin, 2007).

Le bassin compte plusieurs zones de marécages très importantes, telles que le Grand Yaéré tout au nord du Cameroun (Ketchemen, 1992), le lac Tchad, le lac Fiti, Massénya et Salamat au sud-est, et le Komadougou Yobé au nord-est du Nigeria. Avec un maximum de quatre 4 mètres de profondeur, le lac Tchad peut être considéré comme un marécage dans une grande partie de la cuvette sud et dans l'ensemble de la cuvette nord.

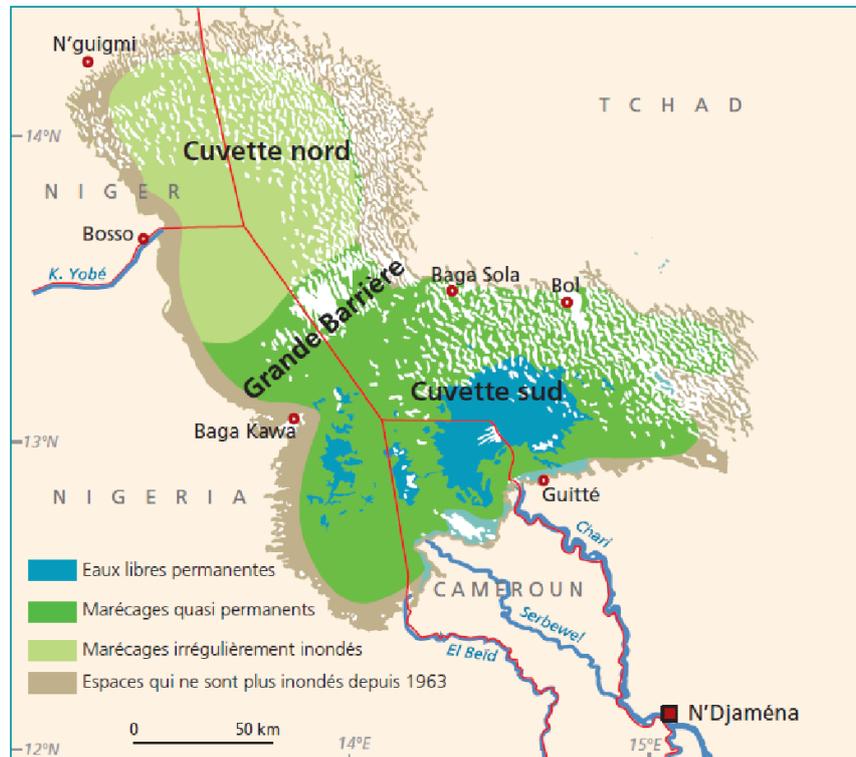


Figure 6 : Paysages du lac Tchad depuis la fin des années 1990 (d'après Lemoalle, 2015)

La principale caractéristique hydrologique de la région reste le lac Tchad lui-même, réceptacle de toutes les eaux de surface et probablement d'une partie des eaux souterraines peu profondes de la région. Sa caractéristique principale est la variabilité de son niveau et de sa surface. En effet, depuis 1950, sa surface a varié entre 1 700 et 24 000 km². En période de Moyen Tchad (1954-69), 90% des apports au lac provenaient principalement du complexe Chari-Logone (Lemoalle, 2015). La grande variabilité de la surface en eau du lac gouvernée par les fluctuations interannuelles de la pluviométrie sur son bassin d'alimentation, affecte significativement les paysages et les ressources naturelles. Cependant, cette variabilité détermine la disponibilité et la diversité des ressources vitales pour l'amélioration des conditions de vie des communautés de la cuvette nord (Kiari Fougou, 2014).

La fertilité des terres, la présence de l'eau, l'intensification des migrations et des mobilités sont autant d'éléments favorable à la diversification des activités au sein de cette cuvette (Rangé & Abdourahamani, 2014). Ce qui a favorisé le développement de la pluriactivité (pêche, agriculture, élevage) selon les années et les saisons. En dépit de ses ressources et des services que rend la cuvette nord du lac Tchad, celle-ci est particulièrement exposée à un certain nombre de menaces : ensablement, assèchement, densification de la population et insécurité.

L'évolution récente du lac Tchad

Le lac Tchad a connu une longue histoire de périodes humides et sèches couvrant plusieurs échelles de temps, de l'échelle géologique à l'échelle annuelle et saisonnière (Lemoalle, 2015). Les paysages actuels résultent de sa topographie et de son histoire récente. Le lac Tchad est formé de deux cuvettes sud et nord qui sont séparées par une zone de hauts-fonds, la Grande Barrière (Figure 7). Comme les apports dépendent directement de l'importance des pluies sur le bassin versant, le lac est très sensible aux variations climatiques.

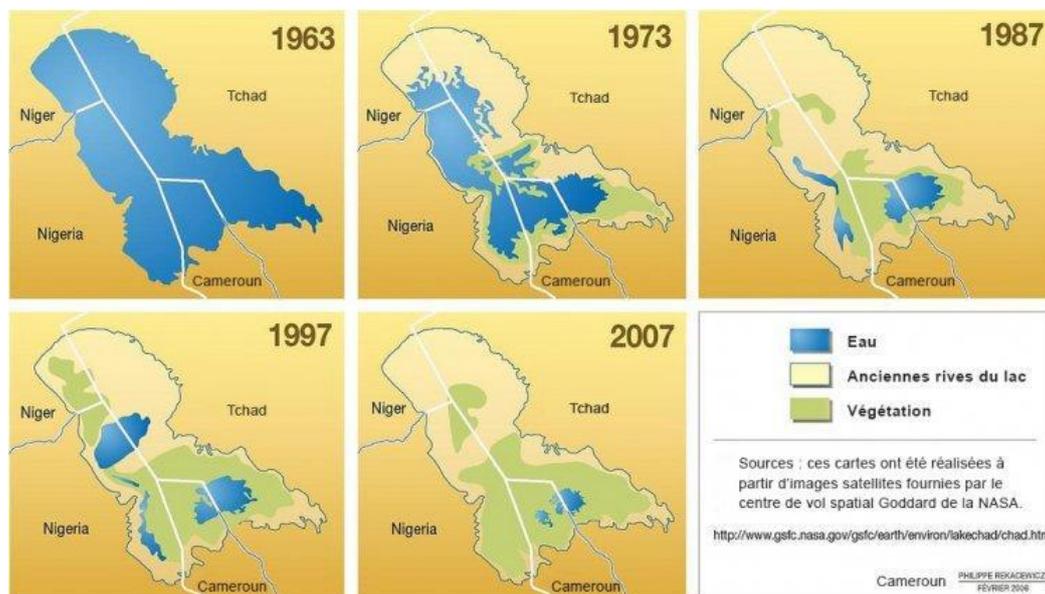


Figure 7 : Évolution du lac Tchad depuis les années 60 (source : NASA pour CBLT, 2008)

En conditions naturelles, le lac est un amplificateur des variations des pluies annuelles sur son bassin versant. Dans son état actuel, l'hydrologie du lac est contrôlée par la Grande Barrière, le seuil qui sépare les cuvettes sud et nord du lac. Son altitude est d'environ 279,0 m, mais elle est couverte d'une végétation dense qui ralentit le passage de l'eau sur une largeur de 40 km

entre les deux bassins. Lorsque la crue du Chari arrive dans la cuvette sud, le niveau de cette cuvette augmente. Si le niveau compris entre 279,5 et 280 m est atteint, la cuvette sud déborde vers la cuvette nord à travers la Grande Barrière. L'extension maximale de cette inondation a lieu en mars - avril et son importance est fonction de celle de la crue du Chari. Dans ce stade qualifié de Petit Tchad, les zones très irrégulièrement inondées de la cuvette nord présentent des aspects très différents suivant la saison ou l'année : végétation palustre, espaces cultivés ou steppe semi-désertique à Calotropis, forêt de Prosopis active ou morte. Ce sont principalement ces zones de la cuvette nord qui présentent la plus forte variabilité de hauteur d'eau et de surface inondée, cette dernière a été suivie à l'aide des données satellitaires. Tandis que le cycle annuel de la cuvette sud en phase de Petit Tchad est relativement reproductible d'une année sur l'autre, le cycle de la cuvette nord est hautement variable puisqu'il dépend de l'excédent d'eau disponible (Lemoalle et al., 2012). Ainsi, les années de sécheresse complète de la cuvette nord ont un impact particulièrement sévère sur les conditions de vie des populations.

La figure 8 représente la surface en eau de la cuvette nord (S_n), la surface en eau de la totalité de la cuvette sud (zone centrale de la cuvette sud S_s plus surface de l'archipel S_a) et la surface totale en eau (S_{total}). On note qu'après une phase de forte sécheresse dans les années 1980, la cuvette nord a été mieux alimentée et la surface totale du lac est redevenue plus importante avec une moyenne de 8000 à 10 000 km² à partir de la fin des années 1990, sauf en 2010. Une analyse fine des données du satellite Landsat au cours du maximum d'extension de l'inondation de la crue lacustre exceptionnelle en 2013 a donné une surface totale en eau du lac de 14800 km² (Goudoum et Lemoalle, 2014).

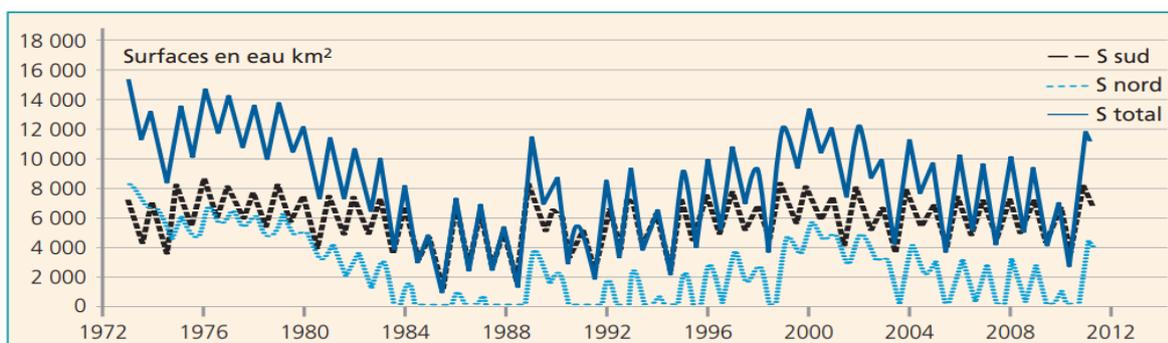


Figure 8 : Évolution observée et/ou simulée de la surface inondée de la cuvette nord (S_n), de l'ensemble de la cuvette sud (S_s+S_a) et du lac entier (S_{total}) de 1972 à 2012 (Bader et al., 2011).

Comme indiqué par le graphique de la Figure 8, les surfaces en eau des différentes parties du lac varient rapidement et de façon importante. Il est donc important de se rapporter à des dates précises pour comprendre l'évolution du lac ou une situation à un moment donné ainsi que la succession des activités sur le terrain.

2.1.4. Caractéristiques socio-économiques

Sur l'ensemble de la zone la zone d'étude, comme dans toute l'Afrique rurale, la demande en eau augmente fortement du fait d'un accroissement de la population à un rythme trop rapide pour s'accompagner d'un changement du système agraire, et aussi, à terme, de l'élévation du niveau de développement économique. Dans tous les pays, les dernières décennies ont vu une urbanisation très rapide, tendance qui va probablement se maintenir ; et les gouvernements sont fortement préoccupés par l'amélioration des conditions de distribution d'eau "saine" aux populations. Les effets de la péjoration climatique sont amplifiés par les déséquilibres humains : l'intensification de la culture sur brûlis, extensive par définition, a conduit à la destruction rapide du couvert végétal (d'autant que la croissance démographique induit aussi une hausse de la consommation du bois, d'espace pour le pâturage, etc.).

La population sur l'ensemble des pays concernés par l'étude est estimée à près de 450 millions d'individus et montre un profil démographique caractéristique de la plupart des pays en voie de développement, à savoir :

- Inégale répartition géographique. La densité varie de 9 hab/ km² en RCA à près de 220 hab/km² au Nigeria. Cette densité démographique est deux fois plus forte en région forestière (habitations localisées le long des voies de communications) qu'en région de savane (habitations dispersées en villages). Cette répartition reflète également le déséquilibre économique entre les grands centres urbains et les autres régions moins nanties ;
- Progression rapide. Le taux de croissance démographique annuel est estimé à 2.89 % sur la période 1980-2015. Il varie de 2,2 % en République Centrafricaine à 3,4 % au Niger ;
- Fort pourcentage de jeunes. Comme c'est le cas pour l'ensemble des régions africaines, près de 45 % de la population totale sur la zone d'étude a moins de 15 ans. Pour la période 2010-2015, l'espérance de vie à la naissance était de 56,3 ans, et varie

de 49,5 ans en République Centrafricaine à 63,1 ans au Soudan. En 2018, la moyenne du taux de natalité était de 36,8 ‰, variant de 33 ‰ en RD Congo à 44 ‰ au Niger, et on dénombrait en moyenne 5,4 enfants par femme.

Toutefois, les prévisions d'évolution démographique peuvent être fortement erronées en raison des mouvements massifs des populations qui s'observent surtout dans les pays du Sahel, avec pour cause l'attrait des grandes villes avec une urbanisation rapide, et le délaissement des régions frappées par la désertification, aléas économiques ou encore guerres et évènements internes. Ces flux migratoires sont importants mais difficilement chiffrables (Ardoin-Bardin, 2004).

Le secteur agricole demeure le moteur du développement économique et social des pays de la zone d'étude. Ce secteur emploie entre 70 % et 90 % de la population active et procure de 30 % à 50 % du PIB national, selon les pays. Deux types de productions se partagent le marché : les cultures vivrières et les cultures d'exportation ou de rentes. Les cultures vivrières sont en grande partie destinées à satisfaire la demande intérieure. Les principaux produits vivriers sont des céréales telles que le mil, le sorgho, le maïs, le riz et des féculents tels que le manioc, l'igname, la banane plantain et la patate douce. Les cultures de rente sont réservées à l'exportation : coton (première ressource et premier produit d'exportation), arachide, café, cacao, bananes et ananas. La culture du palmier à huile et le sucre occupent une place marginale sur le marché international. L'élevage des bovins, ovins, et caprins ne représente que la seconde ressource interne des pays. La pêche ne représente qu'un complément alimentaire, mais c'est une activité répandue dans absolument tous les cours ou plans d'eau de la région.

La population urbaine se partage les activités de commerce, d'industrie, de services et de tourisme. Les activités du secteur industriel sont encore embryonnaires dans les pays de la zone d'étude et elles sont dominées par l'agro- alimentaire : industrie sucrière, brasseries, conserveries et activités de transformations. Dans la partie nord-est de la RD Congo, il se développe également des activités.

2.2. DONNEES

Compte-tenu du déficit relatif en informations scientifiques sur le climat dans la région du Bassin du Congo (Washington et al. 2013), et aussi de la rareté des données collectées in situ dans toute la zone étudiée, plusieurs sources des données ont été explorées. Il s'agit des jeux de données ci-après :

- Données de l'Unité de Recherche sur le Climat – CRU : il s'agit des données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle couvrant la période de 1950 à 2018. Ces données sont quadrillées sur une grille de 0.5° (50kmx50km) (Mitchell and Jones, 2005), avec une résolution temporelle mensuelle.
- Les données du Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) : ce sont des données de précipitations issues de satellites recalées à l'aide de stations pluviométriques au sol (Funk et al., 2015) fournies par United States Geological Survey (USGS). Elles ont une résolution de 0.05° (c'est à dire 5kmx5km) et une résolution temporelle journalière. Elles couvrent la période 1981-2015.
- Les données du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM) fournies par HydroSciences Montpellier.

Etant donné que chaque ensemble de données est obtenu selon des méthodes différentes les unes des autres, il est important d'évaluer la performance de ces produits face aux données des stations au sol. Les moyennes mensuelles des pluies fournies par la FAO ont été aussi utilisées dans cette comparaison en vue de déterminer quelle source des données représente le plus fidèlement possible la distribution des données au sol. Sur ce, trois stations ont été choisies dans la région d'étude dont une dans la partie Nord et deux autres dans la partie Sud. Il s'agit des stations d'Abeche au Tchad pour la partie Nord, et les stations de Mbandaka et Butembo en RDC pour la partie Sud. Ce choix de ces stations s'est fait en tenant compte de la disponibilité d'une longue série des données de la station au sol.

La figure 9 présente la distribution des pluies selon toutes les sources de données exploitées, pour les trois stations sélectionnées.

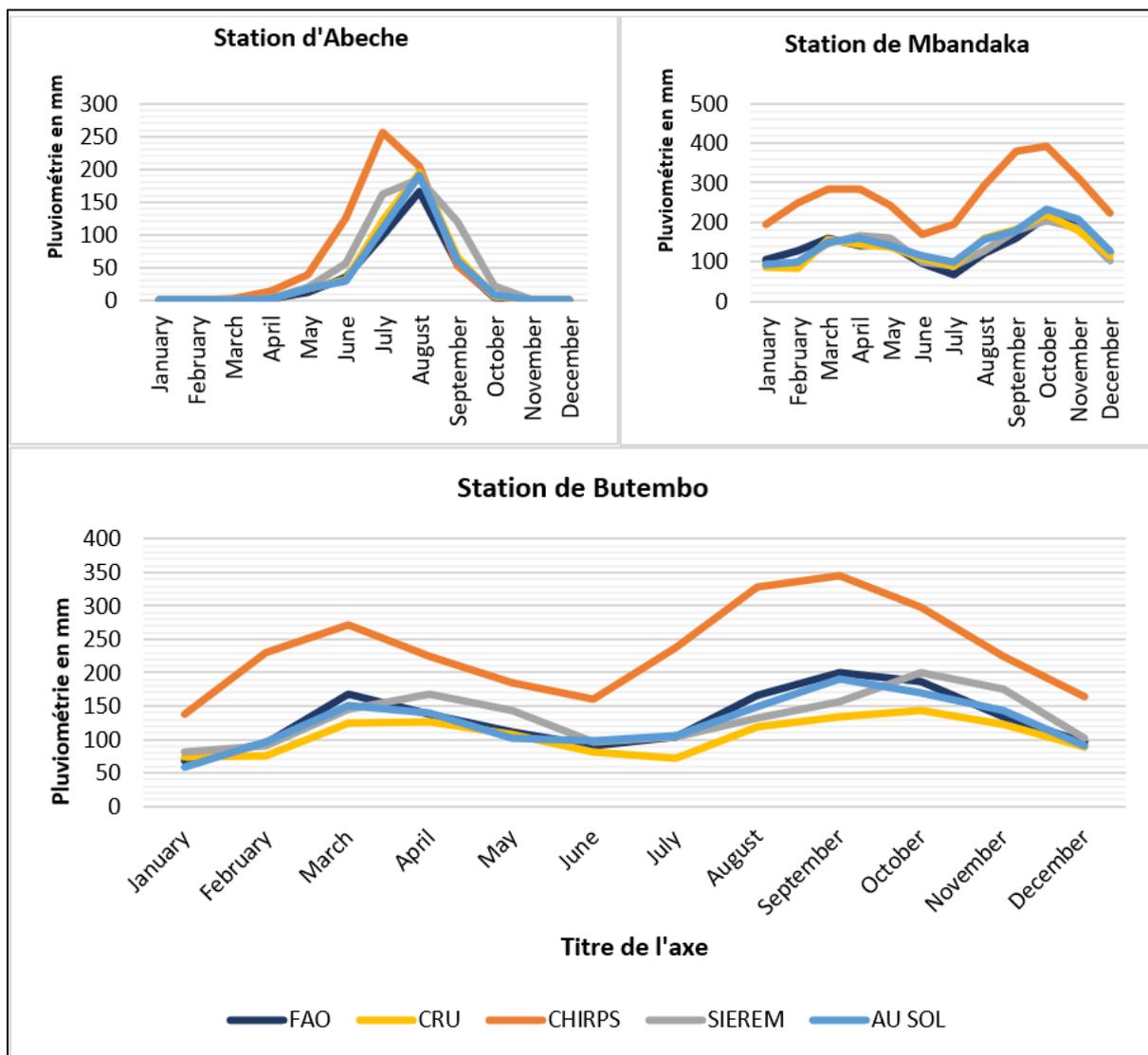


Figure 9 : Distributions mensuelles des pluies selon les données FAO, CRU, CHIRPS, SIEREM et des stations au sol

- **STATION D'ABECHE**

De l'analyse des données, il se dégage que tous les ensembles de données suivent la même distribution que les données de la station au sol. Seulement, il se dégage une nette différence liée à leur corrélation avec les données au sol. Le calcul du coefficient de corrélation donne pratiquement 99 % pour les données CRU contre 94 % et 86 % pour les données SIEREM et CHIRPS. Les données CHIRPS présentent des valeurs mensuelles plus élevées que le reste des données, et son pic des précipitations s'observe au mois de Juillet alors que c'est le mois d'Août pour les autres ensembles des données.

- **STATION DE MBANDAKA**

De l'analyse des ensembles des données tel que présenté à la figure 9 ci-dessus, il s'observe que toutes les séries suivent la même distribution que les données de la station au sol. Le calcul du coefficient de corrélation donne pratiquement 98 % pour les données CRU contre 93 % et 88 % pour les données SIEREM et CHIRPS. Comme c'est le cas pour la station d'Abeche, les données CHIRPS à la station de Mbandaka présentent des valeurs mensuelles élevées que le reste des données.

- **STATION DE BUTEMBO**

A la station de Butembo, la situation est presque similaire à celle des autres stations étudiées. La distribution des pluies mensuelles est presque la même pour tous les ensembles des données. Les données CRU ont près de 90 % de corrélation avec les données au sol, contre 89 % et 82 % pour les données CHIRPS et SIEREM.

Eu égard au résultat de la comparaison ci-dessus, les données CRU se sont faites remarquer par leur corrélation étroite avec les données au sol de la région d'étude, et de ce fait, elles sont celles qui ont été utilisées pour l'ensemble des analyses de variabilité climatique menées dans cette étude.

Pour ce faire, dix (10) stations de la région d'étude ont été sélectionnées en vue d'étudier la variabilité des précipitations au cours de la période allant de 1950 à 2018. Leur répartition géographique tient compte de toutes les zones climatiques qui couvrent la zone d'étude. Les stations sélectionnées sont : Abeche, Yao, Ndjamena, Bambari, Batouri, Bangui, Bambesa, Ifondo, Butembo et Mbandaka. Les données ont été extraites à chaque station après interpolation de la grille des données CRU sur l'ensemble de la zone d'étude.

La figure 10 ci-après présente la situation géographique de toutes les stations au sol utilisées dans cette étude.

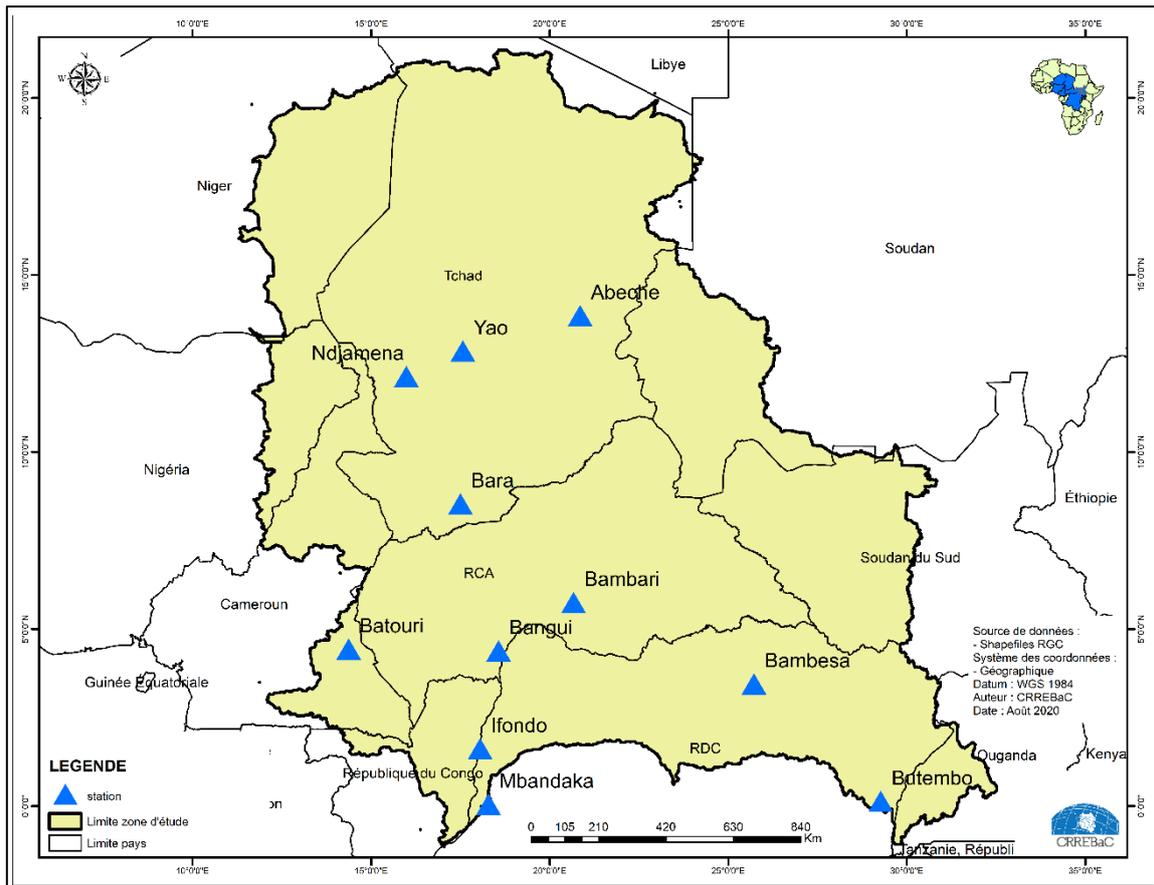


Figure 10 : Situation géographique de stations au sol utilisées dans cette étude

2.3. METHODES

Les méthodes d'analyse utilisées dans cette étude sont subdivisées en cinq grandes composantes, à savoir :

- L'analyse de la variabilité des séries chronologiques ;
- Le développement des indices climatiques ;
- L'analyse spatiale de la variabilité climatique ;
- Analyse de la vulnérabilité au niveau régional ;
- L'analyse des scénarios climatiques futures.

2.3.1. Analyse de la variabilité des séries chronologiques

Il s'agit de procéder à l'analyse des indices standardisés en mettant en relief les années excédentaires, et les années déficitaires. Ainsi, l'application des droites de tendances a permis

de savoir dans quel sens évolue la pluviométrie (vers la baisse ou vers la hausse). Cette information a nécessité d'être confirmée par des tests non paramétriques.

2.3.1.1. Détection de la variabilité temporelle

Sur chacune des régions climatiques constituant la zone d'étude, la moyenne spatialisée de la pluie sera calculée au pas de temps annuel, saisonnier et décennal. Ainsi, suivant les régimes des précipitations, la variabilité pourra être caractérisée à ces différentes échelles.

➤ *Cartographies des indices pluviométriques*

Cette méthode de l'indice pluviométrique est appliquée dans le but d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années. Elle a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires. Ainsi, pour chacune des stations pluviométriques retenues, un indice de la pluie interannuelle a été déterminé.

La variabilité interannuelle des pluies est analysée en se basant sur l'Indice de Pluviométrie Standardisée (IPS) (Nicholson, at al., 1999) calculé selon la formule ci-après :

$$Z = \frac{(X_i - X)}{\sigma}$$

Où Z est l'Indice de Pluviométrie Standardisée, X_i le cumul pluviométrique de l'année i , X la moyenne des cumuls annuels sur la période considérée, et σ l'écart-type sur cette période.

Les valeurs annuelles négatives de Z indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide.

La région d'étude étant subdivisée en cinq grandes zones climatiques, le choix a été porté sur des stations en tenant compte de la répartition spatiale de ces zones.

➤ *Calcul des pluies décennales*

A l'aide des données issues de différentes stations, il est procédé aux analyses en vue de détecter les régions homogènes du point de vue de la variabilité. Pour ce faire, la moyenne des cumuls annuels des précipitations est calculée pour chaque période de 10 ans, partant de

l'année 1950. Ceci a permis de capter les tendances de la pluviométrie au cours des différentes décennies, et dans diverses régions de la zone d'étude.

2.3.1.2. Calcul des déficits (ou excédents) de précipitations autour des dates de rupture

Les déficits ou les excédents (exprimés en valeur absolue ou relative) représentent des écarts par rapport à une normale définie, qui est généralement la moyenne sur une période donnée (Lienou, 2007). Cependant, la persistance de la sécheresse dans certaines régions pose le problème du choix de la période à utiliser pour le calcul d'une moyenne représentative du climat local. Les moyennes calculées sur des séries complètes sont alors le plus souvent des paramètres qui dépendent davantage de la longueur de la série considérée que d'une situation climatique normale.

Ainsi, les déficits (ou excédents) d'une année ou d'une période ont été caractérisés dans cette étude en considérant à la moyenne de la série avant la date de rupture, qui représente le plus souvent une chronique statistiquement homogène.

2.3.1.3. Classification des régions pluviométriques

Cette classification est faite en regroupant les séries chronologiques des précipitations ayant des distributions temporelles similaires, en se basant sur leurs moyennes mobiles calculées sur chaque période de cinq (5) ans (Tshimanga, 2012).

Les moyennes mobiles ont permis d'avoir des séries lissées à l'échelle stationnelle et temporelle. Le but est de réduire l'amplitude des variations interannuelles et de ne faire apparaître que les grandes tendances. Cette technique de moyenne mobile a facilité la pondération des événements extrêmes comme la sécheresse, et introduit une organisation artificielle sur la moyenne oscillatoire.

2.3.1.4. Test non paramétrique de Pettitt

Pour rechercher les tendances et d'éventuelles ruptures de stationnarité dans les séries chronologiques, il est utilisé le test non paramétrique de Pettitt.

Le test de Pettitt (1979) a été appliqué dans l'optique de préciser la position du point d'inflexion marquant une rupture éventuelle. Lorsque l'hypothèse nulle (H_0) est acceptée, on

déduit qu'il n'y a pas de rupture dans la série (X_i) de taille N . A contrario, Dumolard et al. (2005) pensent que si l'hypothèse est rejetée, on conclut par une estimation de la date de rupture en considérant le maximum de valeur absolue observée dans la série. Feizouré (1994) et Beangai (2003) ont appliqué ce test pour détecter les points de rupture de stationnarité dans les séries hydro-pluviométriques du bassin centrafricain de l'Oubangui.

La mise en œuvre de ce test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques appartiennent à la même population. La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie, et elle permet d'apprécier l'importance de la rupture. L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle.

Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne (Hubert et al., 1998 ; Lubès-Niel et al., 1998). Le test de Pettitt suppose l'absence d'autocorrélation et la constance de la variance comme condition d'application.

Le logiciel statistique XL-STAT a été utilisé pour effectuer le test de Pettit pour chaque station étudiée.

2.3.2. Calcul de l'Indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI)

Le SPEI est un indice relativement récent utilisé pour apprécier la tendance de la sécheresse dans une région donnée (Bouly et al., 2020). Il repose sur les mêmes bases que l'Indice standardisé de précipitations (SPI). Mais à la différence de ce dernier, le SPEI ajoute la température, pour tenir compte de l'effet de celle-ci sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Le SPEI est considérée comme un indice de sécheresse amélioré, particulièrement adapté à l'analyse de l'effet du réchauffement climatique sur les conditions de sécheresse (Beguería et al., 2015).

Comme indiqué ci-dessus, le SPEI est basé sur un bilan hydrique climatique qui est déterminé par la différence entre Précipitations (P) et Evapotranspiration Potentielle (ETP) pour le mois m :

$$Dm = Pm - ETPm$$

Dm fournit une mesure simple de l'excédent ou du déficit en eau pour le mois m étudié. L'ETP est calculé suivant l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Suite au manque de sources de données en temps réel dans la zone d'étude, les données SPEI du moniteur mondial SPEI généré par l'Unité de Recherche sur le Climat (CRU) ont été utilisées dans cette étude. Ce moniteur est basé sur l'équation de Thornthwaite pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Sur base des valeurs mensuelles extraites de cette base des données, les moyennes annuelles ont été calculées afin de caractériser les fluctuations de sécheresse durant la période considérée dans cette étude.

Les catégories de sécheresse en fonction des valeurs de SPEI sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2. Catégorisation du degré de sécheresse/ humidité en fonction du SPEI

Valeurs SPEI	Séquences de sécheresses	Valeurs SPEI	Séquences humides
$SPEI < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < SPEI$	Extrêmement humide
$-1,50 < SPEI < -1,99$	Sévèrement sèche	$1,50 < SPEI < 1,99$	Sévèrement humide
$-1,00 < SPEI < -1,49$	Modérément sèche	$1,00 < SPEI < 1,49$	Modérément humide
$0,00 < SPEI < -0,99$	Légèrement sèche	$0,00 < SPEI < 0,99$	Légèrement humide

2.3.3. Analyse spatio-temporelle de la variabilité pluviométrique

Il est fait recours aux techniques de Système d'Information Géographique pour analyser la répartition, dans l'espace et dans le temps, des éventuels changements majeurs que connaîtrait la zone d'étude. L'analyse spatiale par interpolation des données des précipitations a été conduite afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des précipitations mensuelles dans la zone d'étude.

2.3.4. Analyse des scénarios de changement climatique

Pour cette étude, six modèles climatiques globaux (GCMs) ont été choisis parmi les modèles existants de l'exercice CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Taylor et al. 2012). En dehors de la disponibilité des données, le choix de ces modèles a été motivé par leur utilisation fréquente dans les études climatiques au niveau global. Les institutions détentrices de ces modèles sont présentées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 3 : Résolutions et abréviations des six modèles utilisés

Centre de modélisation	Nom abrégé du modèle
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis CCCma	CANRCM4_CanESM2
Centre National de Recherches Météorologiques/ Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique - CNRM	CERFACS-CNRM-CM5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Center of Excellence - CSIRO	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0
A European community Earth-System Model – EC-EARTH	ICHEC-EC-EARTH
National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC-MIROC5

Les différentes projections de changement climatique produites de cette étude sont issues de l'analyse comparative des moyennes décennales des précipitations issues des sorties des six modèles, sous le scénario de stabilisation de la concentration des GES RCP4.5. Ce scénario a été choisi car il facilite la détermination du niveau de vulnérabilité et d'exposition des secteurs socio-économiques. De surcroît, plusieurs bases de données climatiques disponibles sont dotées d'informations complètes sur les variables climatiques nécessaires à l'analyse de ce scénario. Il s'agit donc également d'un scénario de consensus pour l'étude du changement climatique dans la plupart des pays africains.

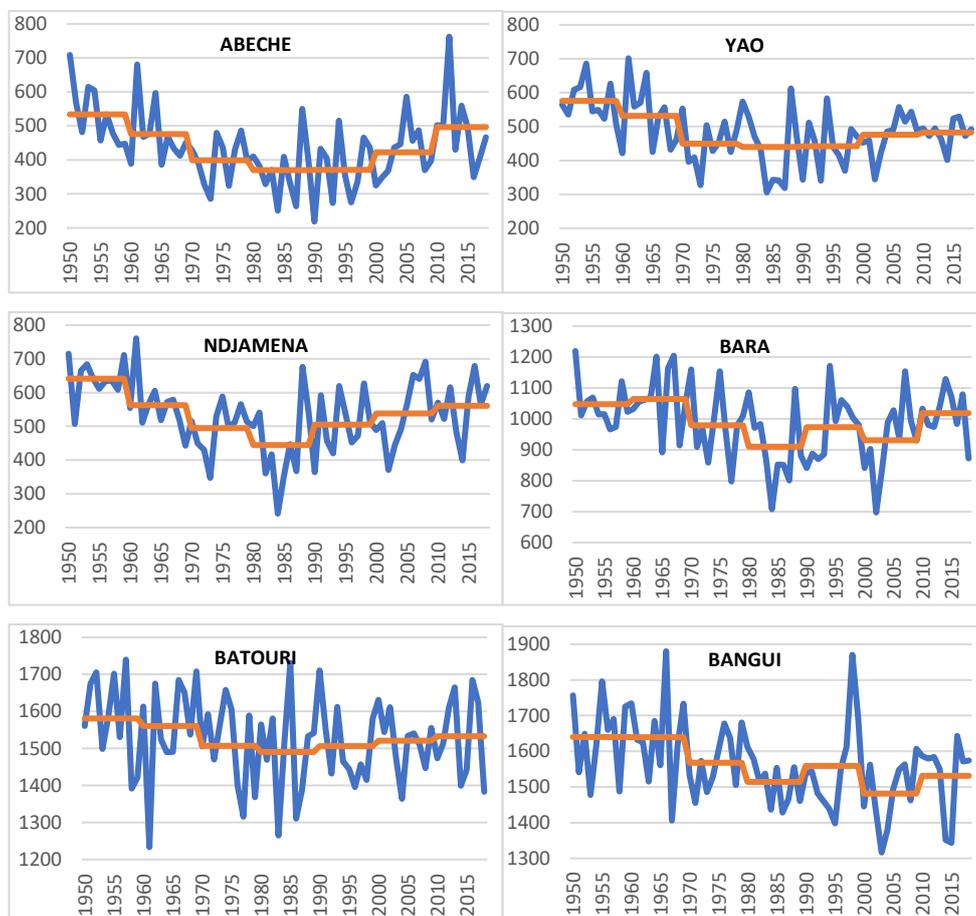
Ainsi, pour les stations représentatives de chacune des régions pluviométriques produites selon la démarche décrite à la section 2.3.1.3 de ce travail, leurs moyennes décennales calculées partant de l'année 2041 jusqu'en 2100 (six décennies) ont été confrontées aux moyennes avant la rupture de stationnarité de chaque station. Pour les stations n'ayant pas connu de rupture, c'est la moyenne de la série a été utilisée. L'analyse graphique à l'aide de l'outil XLSTAT a ainsi facilité la capture des tendances de la pluviométrie au cours des différentes décennies à venir, et pour chaque région de la zone d'étude.

Chapitre III : ANALYSE DE LA VARIABILITE ET TENDANCE CLIMATIQUE DANS LA ZONE D'ETUDE

3.1. DETECTION DE LA VARIABILITE TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS

3.1.1. Caractérisation de la variabilité annuelle des précipitations et moyennes décennales

La figure 11 ci-après présente l'évolution interannuelle des cumuls des pluies annuelles et les moyennes calculées pour chaque décennie.



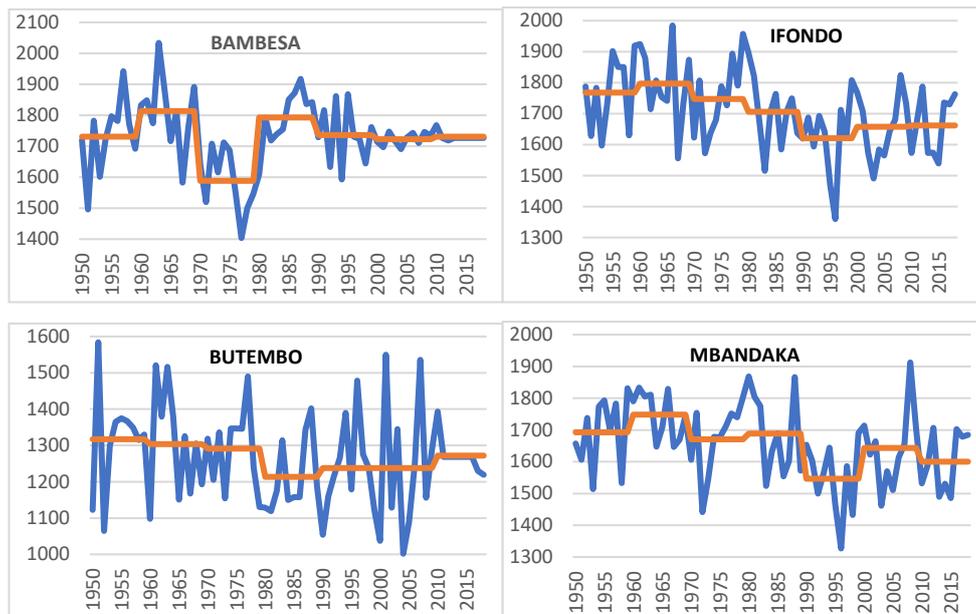


Figure 11 : Evolution interannuelle des cumuls des pluies annuelles (en bleu), et moyennes décennales (valeurs en mm) (en rouge)

Il ressort de la figure 11 ci-dessus que la pluviométrie annuelle connaît une grande variabilité spatio-temporelle sur l'ensemble de la zone d'étude. Il s'observe un renversement de situation sur certaines stations, qui voient leur pluviométrie connaître une tendance à la hausse à partir de la décennie 1990. C'est le cas des stations d'Abeche, Yao, Ndjamena et Bara.

Les pluies annuelles sur les stations de Batouri, Bangui, Ifondo, Butembo et Mbandaka montrent plutôt une tendance générale à la baisse.

Quant à la station de Bambesa, elle connaît une variabilité beaucoup plus modérée, avec une légère tendance à la baisse des précipitations, moins perceptible tel que c'est le cas sur les autres stations.

Ces résultats corroborent ceux du Centre mondial de climatologie des précipitations (GPCC) d'Offenbach, qui constatait en 2013 une diminution des précipitations sur une bonne partie de l'Afrique centrale (OMM, 2015).

3.1.2. Caractérisation des périodes sèches et humides

La figure 12 ci-dessous présente la succession des périodes humides et déficitaires par l'application des indices de pluviométrie standardisée à chaque station.

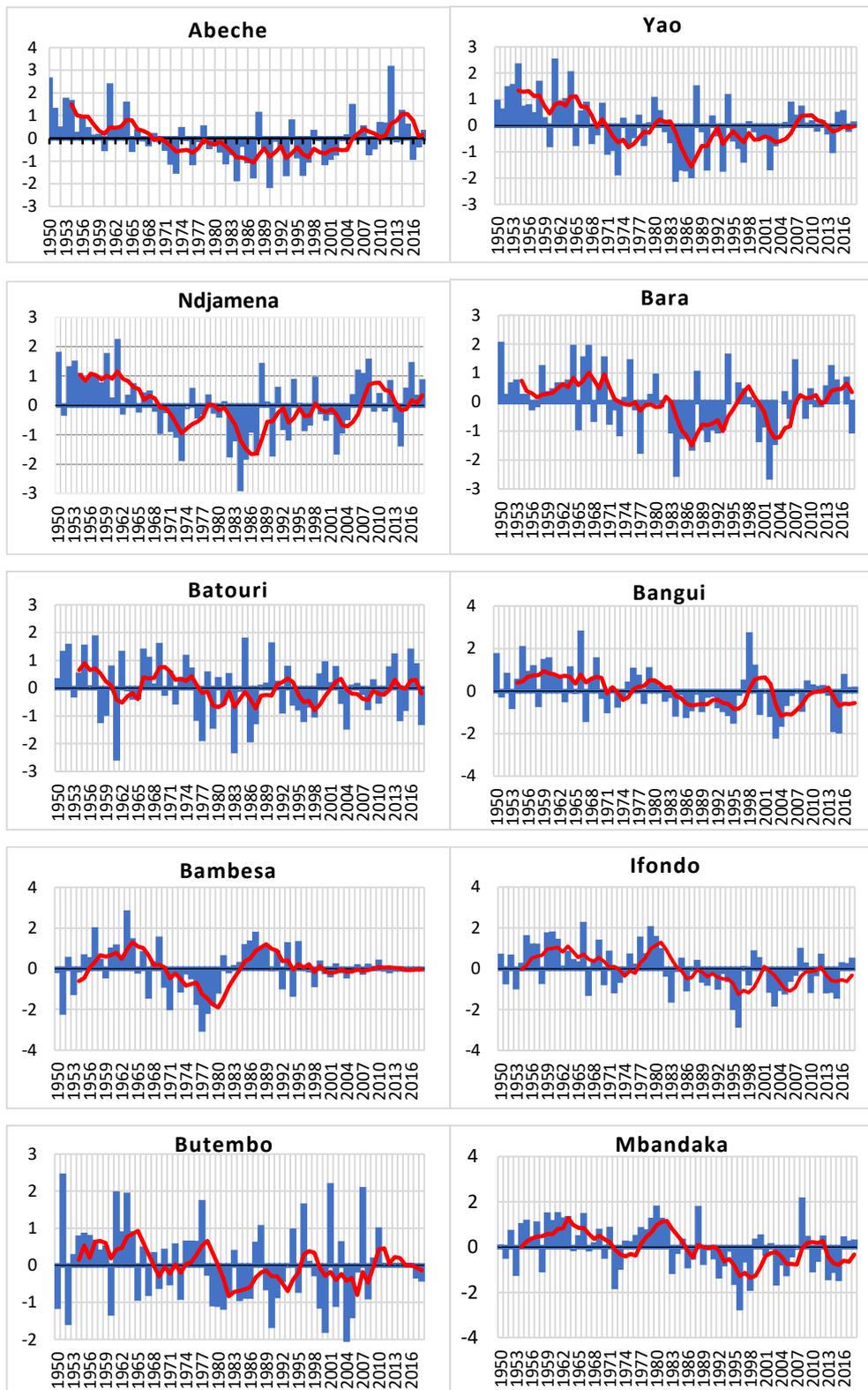


Figure 12 : Fluctuations pluviométriques par application de l'indice des précipitations standardisée

Les résultats de l'application des indices de précipitations standardisés aux données de dix stations permettent d'identifier en général trois (3) grandes périodes : une période humide,

une période normale, et une période déficitaire. Certaines stations affichent plus d'une période sèche ou humide. C'est le cas des stations de Ndjamena, Yao, Bara et Abeche qui affichent une première période déficitaire à partir de 1969 jusqu'en 1974, et une seconde période déficitaire de 1981 à 1986. Cela traduit la sécheresse pour cette région, qui connaît un caractère de sévérité extrême entre 1983 et 1985, années pour lesquelles les écarts centrés réduits des précipitations ont été à leur niveau le plus bas.

A partir de la fin des années 90, il est également observé sur les stations d'Abeche, Ndjamena et Bara un retour aux conditions humides, avec des moyennes pluviométriques respectives de 497 mm, 561 mm et 1018 mm, soit 14 %, 5 % et 3%, des totaux pluviométriques supérieurs aux normales climatiques de 1961 à 1990.

Quant à la station de Bambesa, elle présente une situation particulière. La variabilité pluviométrique y est beaucoup plus modérée, et la tendance à la baisse est légère et moins perceptible. Toutefois, cette station a connu également la sécheresse des années 70, dont la sévérité extrême a été observée durant l'année 1977, avec un indice pluviométrique inférieur à -2,9.

3.1.3. Classification des régions pluviométriques

Une observation attentive de la variabilité interannuelle des précipitations tel que présenté sur la figure 15 ci-dessous indique qu'il existe des similitudes dans la tendance de la variation des précipitations sur la zone d'étude. En regroupant les stations présentant des similarités dans la variabilité de leurs précipitations respectives, on obtient ainsi six régions pluviométriques distinctes tel que présenté dans la figure 13 ci-dessous :

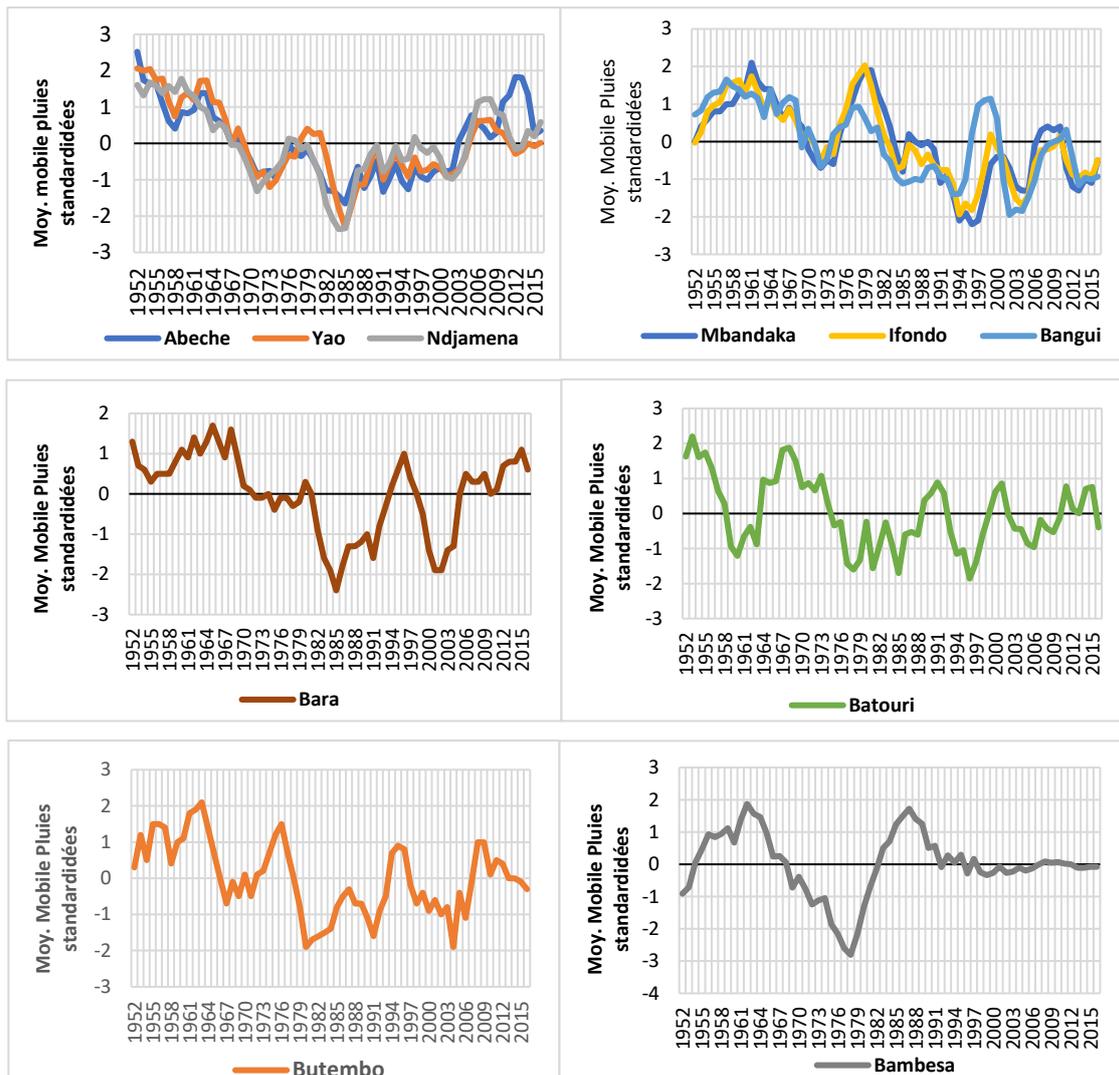


Figure 13 : Classification des régions de variabilité des précipitations sur base des écarts par rapport à la moyenne mobile de 5 ans

Les différentes zones pluviométriques sont définies de la manière suivante :

- Région 1 : située au nord de la zone d'étude, elle couvre les stations de Ndjama, Yao et Abeche. Cette région se caractérise par une longue période sèche couvrant les décennies 70 à 90, et une tendance vers le retour aux conditions humides à partir de l'année 2000.
- Région 2 : située au Sud-Ouest de la zone d'étude, elle est couverte par les stations de Mbandaka, Ifondo et Bangui. Elle est caractérisée par une tendance à la baisse de la variation des précipitations autour de la moyenne.

- Région 3 : couverte par la station de Bara, elle caractérisée par deux périodes de déficit pluviométrique, avec deux pics de sévérité, l'un en 1985 et l'autre en 2002, et un retour aux conditions humides au début des années 2000.
- Région 4 : couverte par la station de Batouri, elle est caractérisée par une oscillation relative des moyennes pluviométriques annuelles autour de la moyenne générale de la série.
- Région 5 : couverte par la station de Butembo, elle est caractérisée par une alternance des périodes sèches et humides dans un intervalle de temps presque régulier.
- Région 6 : couverte par la station de Bambesa, elle est caractérisée par une forte variabilité pluviométrique observée jusqu'aux années 80, et une très faible variation des précipitations autour de la moyenne à partir des années 90.

3.1.4. Mise en évidence des ruptures pluviométriques

Les résultats de l'application du test non paramétrique de Pettitt sur les séries de différentes stations sont regroupés dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 4 : Moment présumé de rupture sur les cumuls annuels

Station	Pays	Zone climatique	Pluie moy. ann. série	Prob. Associée (Test Pettitt)	Année rupture
Abeche	Tchad	BWh	438	0,011	1964
Yao	Tchad	BSh	485	0,001	1967
Ndjamena	Tchad	BSh	535	0,007	1967
Bara	Tchad	Aw	987	0,012	1970
Bangui	RCA	Aw	1562	0,002	1981
Batouri	Cameroun	Aw	1528	-	-
Bambesa	RDC	Am	1731	-	-
Ifondo	Congo	Am	1709	0,009	1981
Butembo	RDC	Af	1268	0,098	1977
Mbandaka	RDC	Af	1656	0,002	1982

De ce tableau, il ressort que huit des stations étudiées connaissent une rupture dans leurs séries respectives, dont trois l'ont connue au cours de la décennie 1960, deux durant la décennie 1970, et les autres au cours de la décennie 1980.

➤ **Variation des moyennes avant et après rupture**

Sur les dix stations étudiées, six d'entre-elles connaissent une rupture au sein de leurs séries chronologiques respectives. Les résultats du calcul des variations moyennes avant et après l'année de rupture pour chaque station sont regroupés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 5 : Moyennes avant et après la date de rupture

Station	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Variation	%
Abeche	530	412	-0,22	-22
Yao	565	457	-0,19	-19
Ndjamena	616	507	-0,22	-22
Bara	1061	957	-0,08	-8
Bangui	1614	1517	-0,06	-6
Ifondo	1776	1650	-0,07	-7
Butembo	1313	1237	-0,06	-6
Mbandaka	1714	1604	-0,06	-6

Il ressort de ce tableau que les stations de la région du Sahel, notamment Abeche, Yao et Ndjamena, connaissent une forte variation des moyennes qui s'évaluent entre 19 % et 22 % des moyennes pluviométriques en-dessous de la moyenne avant la rupture.

Ces résultats indiquent également que les stations du Bassin du Congo connaissent elles aussi une perte en termes de cumuls pluviométriques annuels qui varie entre 6 % et 8 % en dessous des moyennes pluviométriques avant la date de rupture.

3.1.5. Vulnérabilité au niveau régional : catégories de sécheresse déterminées à l'aide de l'Indice Standardisé d'Evapotranspiration et de Précipitation (SPEI)

Les séries de SPEI à l'échelle de 12 mois ont été analysées selon la méthodologie décrite ci-dessus afin de caractériser les conditions sèches ou humides pour les différentes stations en

étude. La figure 14 ci-dessous présente les fluctuations interannuelles du SPEI à travers les dix stations considérées dans cette étude.

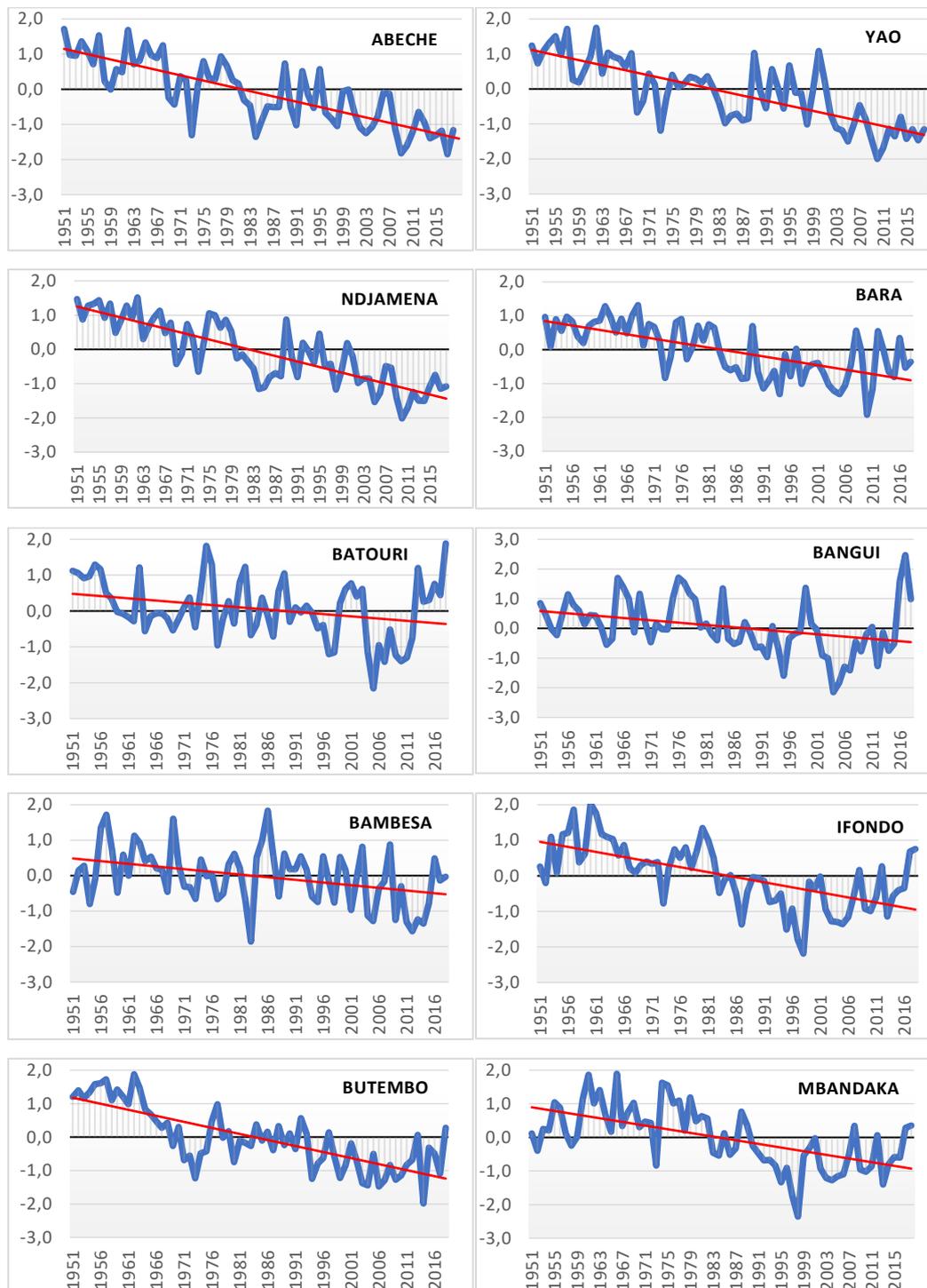


Figure 14 : Evolution fréquentielle des catégories de sécheresse avec le SPEI à l'échelle de 12 mois

La figure 14 ci-dessus présente l'évolution de SPEI à l'échelle de 12 mois, et illustre les multiples fluctuations traduisant une sécheresse hydrologique, dont les impacts potentiels sont donc sur tous les secteurs de la vie de l'homme, mais également sur la biodiversité, à

savoir : l'agriculture pluviale, la recharge des eaux souterraines, les débits et la vie socioéconomique dans son ensemble.

Les séries SPEI pour toutes les stations indiquent une tendance générale au dessèchement sur l'ensemble de la région d'étude. Les valeurs interannuelles du SPEI indiquent que vers les décennies 70 et 80, le déficit en eau s'est accumulé sur plusieurs stations, particulièrement celles du bassin du Tchad (Abeche, Yao, Ndjamena, etc.), traduisant ainsi une sécheresse sévère sur cette région. Ceci justifie une fois de plus les famines pour les populations et les pénuries en pâturage pour les bétails qu'a connu cette région, et explique les grands mouvements migratoires des éleveurs à la recherche de l'eau et des pâturages pour leurs bétails tel que Frappart et al. (2009) l'ont également démontré.

De l'analyse des valeurs interannuelles du SPEI, on constate que les stations du bassin du Congo, notamment celles de la partie Nord du bassin (Ifondo, Butembo et Mbandaka), connaissent également une situation de vulnérabilité à l'eau, à travers des épisodes de sécheresse plus ou moins marqués à partir de la décennie 80.

VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA PLUVIOMETRIE MENSUELLE

De manière générale, la partie Nord (le sahel) se caractérise par l'absence des pluies et la partie Sud par la présence des fortes pluies durant tous les mois de l'année sur la période allant de 1960 à 1990. La figure 15 ci-dessous présente la distribution spatiale des pluies moyennes annuelles sur toute la région d'étude.

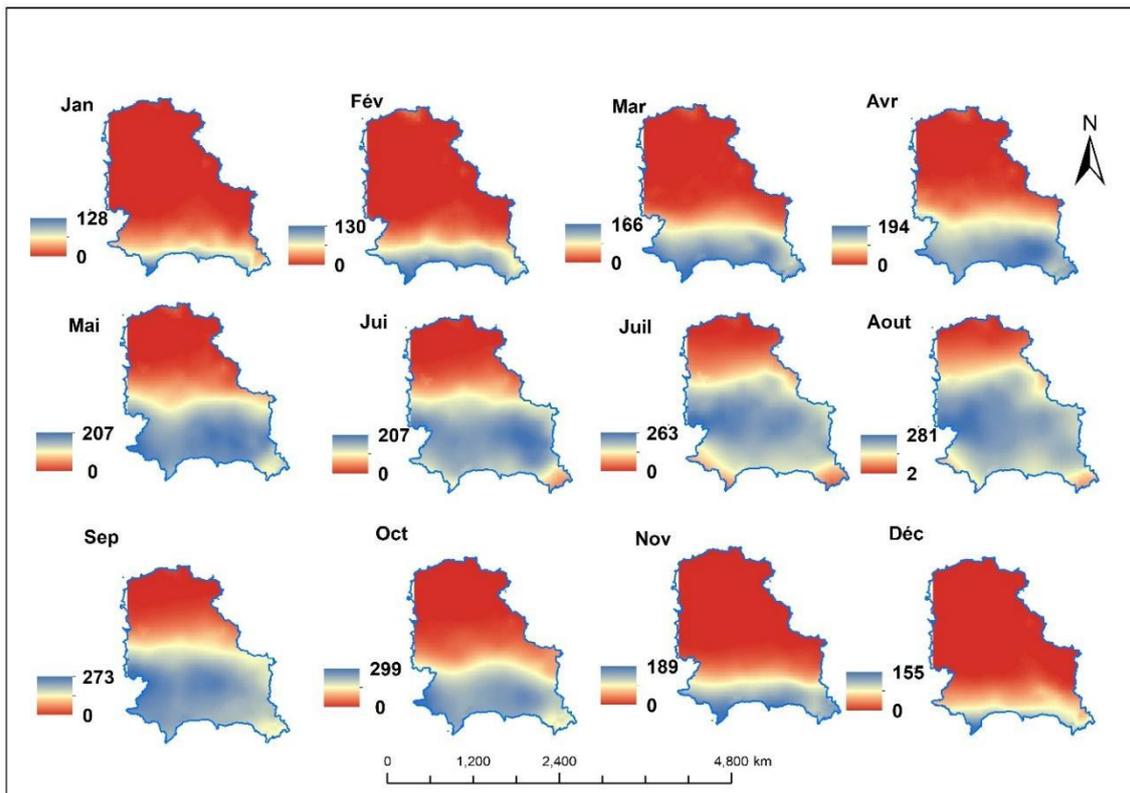


Figure 15 : Distribution spatiale annuelle de la pluviométrie de la région d'étude

La distribution spatio-temporelle des précipitations dans la zone d'étude révèle qu'il y a une diminution des précipitations à partir du mois de Novembre et continue sa chute jusqu'au mois de Février (mois secs). Au mois d'avril il y a des montées des précipitations qui se poursuivent pour atteindre le pic au mois d'Octobre (mois humides). Pour les mois secs, c'est-à-dire de Novembre jusqu'au mois de Mars, cette tendance à la baisse est accentuée dans la partie Nord et centrale du bassin alors que pour les mois humides c'est-à-dire du mois d'Avril jusqu'au mois de Novembre, la partie Sud et centre occupent la masse de la ceinture pluviométrique. Cette masse pluvieuse reste plus ou moins constante sur toute la période humide et se stabilise aux mois de Juillet et d'Aout, bien que des récessions des précipitations apparaissent dans certaines parties du Sud-Est et Sud-Ouest de la région d'étude à partir du mois de Juin jusqu'en Aout.

CHAPITRE IV : ANALYSE DES SCENARIOS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE D'ETUDE

4.1. EVALUATION DE LA SAISONNALITE DE PRECIPITATION PAR APPLICATION DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX

La figure 16 ci-dessous présente les distributions mensuelles de la pluviométrie par station issue des sorties des six différents modèles climatiques globaux appliqués sous le scénario RCP4.5 du GIEC.

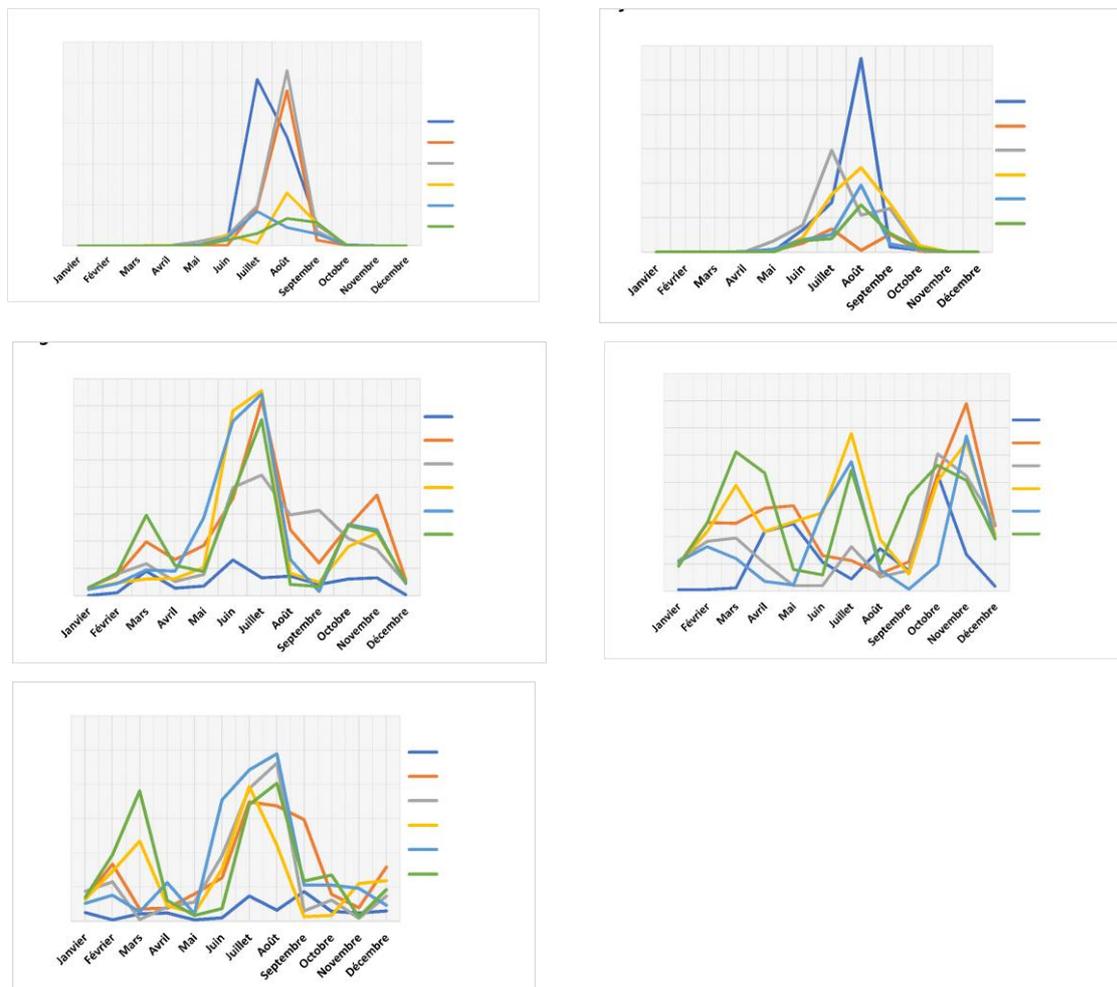


Figure 16 : Distributions mensuelles de la pluviométrie par station selon les différents modèles climatiques globaux

De la figure 16, il se dégage une très large variabilité de la zone d'étude. Certains modèles répondent bien pour les stations du nord alors que ce n'est pas le cas pour les stations du sud, et vice-versa. Cela est sûrement dû aux caractéristiques climatiques de chaque région, et aux incertitudes inhérentes à chaque modèle (Tshimanga et Hughes, 2012).

4.2. ANALYSE DES SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE A LA STATION DE BAMBESA

L'évolution des forçages climatiques, relatifs particulièrement aux précipitations, par rapport à la période de référence est présentée par les sections ci-après. Elle varie en fonction des modèles climatiques.

4.2.1. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE NDJAMENA

La figure 17 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Ndjamenana au Tchad.

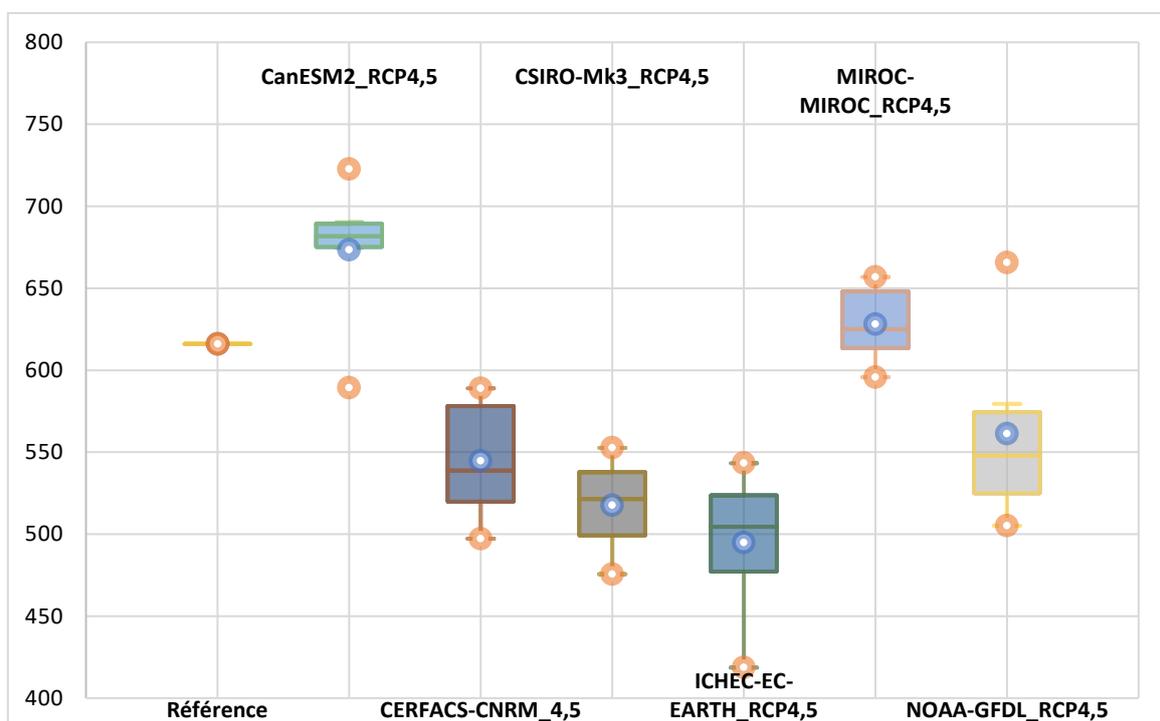


Figure 17 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Ndjamenana

La figure 17 indique qu'à la station de Ndjamenana, deux des six modèles climatiques appliqués (CanESM2 et MIROC-MIROC) prévoient une augmentation des pluies comprise entre 2 à 9 % par rapport à la période de référence. Les quatre autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, ICHEC-EC-EARTH et NOAA-GFDL) prévoient une diminution des précipitations de l'ordre de 9 à 20 % par rapport à la période de référence.

Le modèle optimiste CanESM2 prévoit l'augmentation moyenne des précipitations de 9%, et la décennie 2061-2070 sera la mieux arrosée avec plus de 17% d'augmentation des pluies par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 1).

Le modèle pessimiste ICHEC-ICHEC prévoit une diminution moyenne des précipitations de 20%, et la décennie 2091-2100 sera la plus sèche avec un déficit des précipitations de l'ordre de 31 % par rapport à la période de référence.

4.2.2. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BARA

La figure 18 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Bara au Tchad.

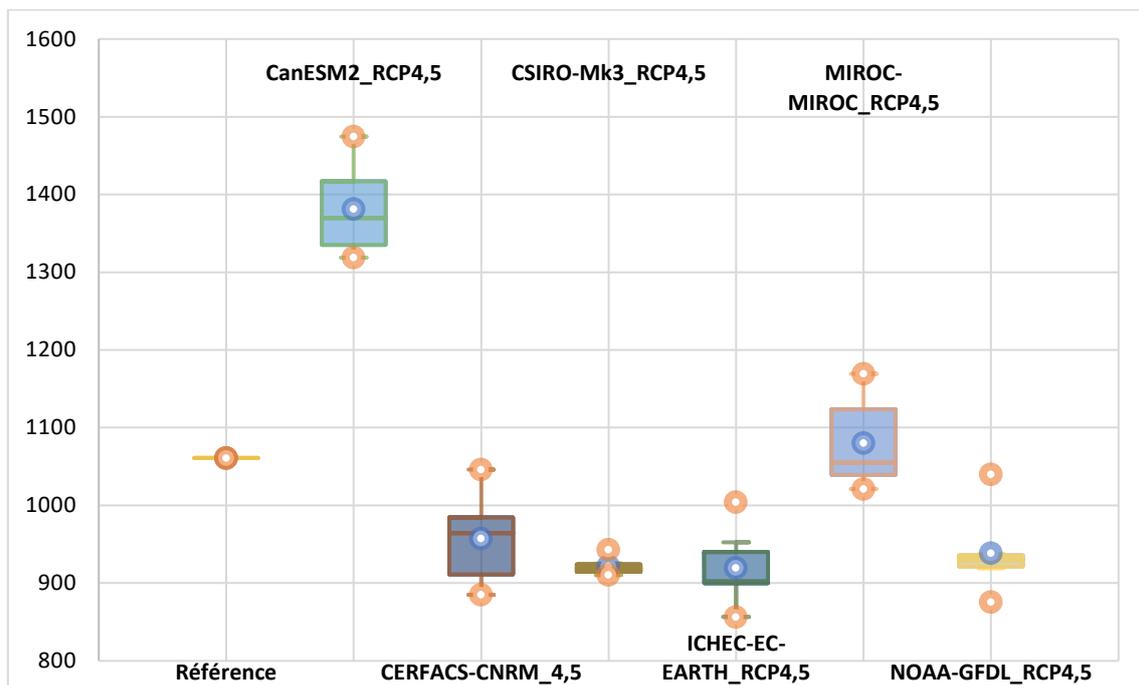


Figure 18 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Bara

La figure 18 ci-dessus indique qu'à la station de Bara, deux des six modèles climatiques appliqués (CanESM2 et MIROC-MIROC) prévoient une augmentation des pluies comprise entre 2 à 30 % par rapport à la période de référence, et les quatre autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, ICHEC-EC-EARTH et NOAA-GFDL) prévoient une diminution des précipitations de l'ordre de 11 à 13 % par rapport à la période de référence.

Le modèle optimiste CanESM2 prévoit l'augmentation significative des précipitations de l'ordre de 30%, et la décennie 2071-2080 sera la mieux arrosée avec près 39% d'augmentation des pluies par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 2).

Le modèle pessimiste ICHEC-ICHEC prévoit une diminution moyenne des précipitations de 13%, et la décennie 2081-2090 sera la plus sèche avec un déficit des précipitations de l'ordre de 15 % par rapport à la période de référence.

4.2.3. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BATOURI

La figure 19 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Batouri au Cameroun.

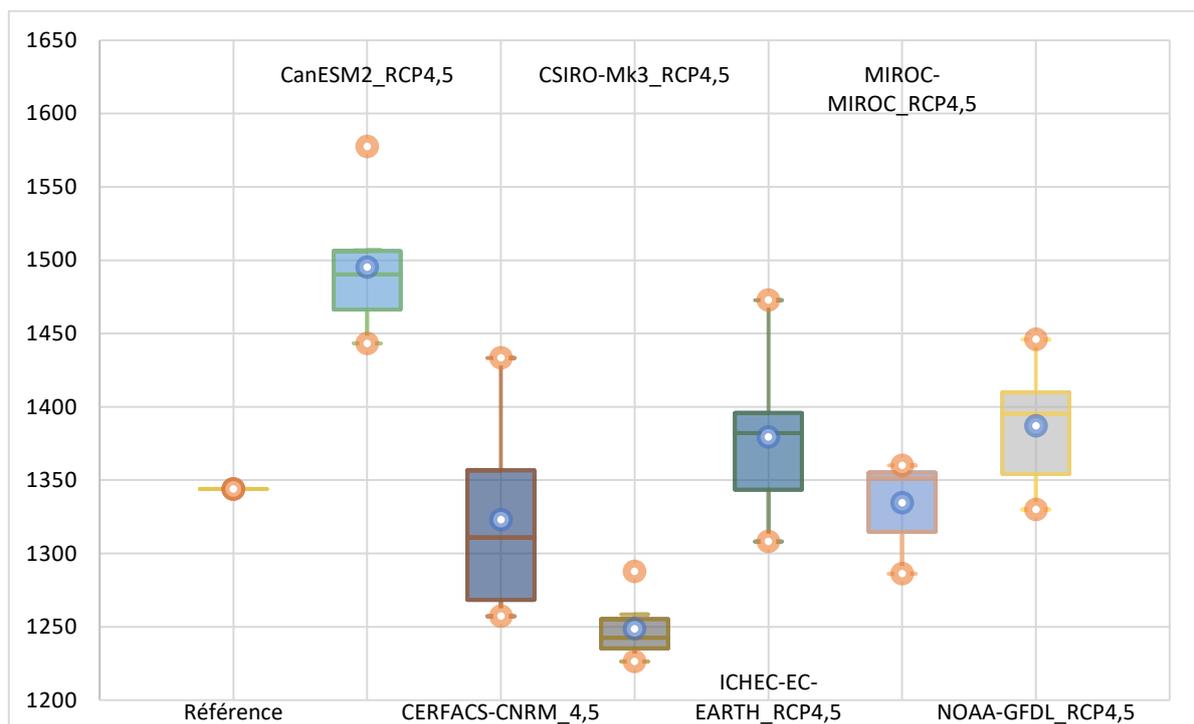


Figure 19 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Batouri

A la figure 19 ci-dessus, il est indiqué qu'à la station de Batouri, trois des six modèles climatiques appliqués (CanESM2, ICHEC-EC-EARTH et NOAA-GFDL) prévoient une augmentation des pluies comprise entre 3 à 11 % par rapport à la période de référence, et les trois autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, et MIROC-MIROC) prévoient une diminution des précipitations de l'ordre de 1 à 7 % par rapport à la période de référence.

Le modèle le plus optimiste CanESM2 prévoit l'augmentation moyenne des précipitations de l'ordre de 11%, et la décennie 2051-2060 sera la mieux arrosée avec plus de 17% d'augmentation des pluies par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 3).

Le modèle pessimiste CSIRO prévoit une diminution moyenne des précipitations de 7%, et la décennie 2051-2060 sera déficitaire avec près de 9% de perte des précipitations par rapport à la période de référence.

4.2.4. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE MBANDAKA

La figure 20 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Mbandaka en République démocratique du Congo.

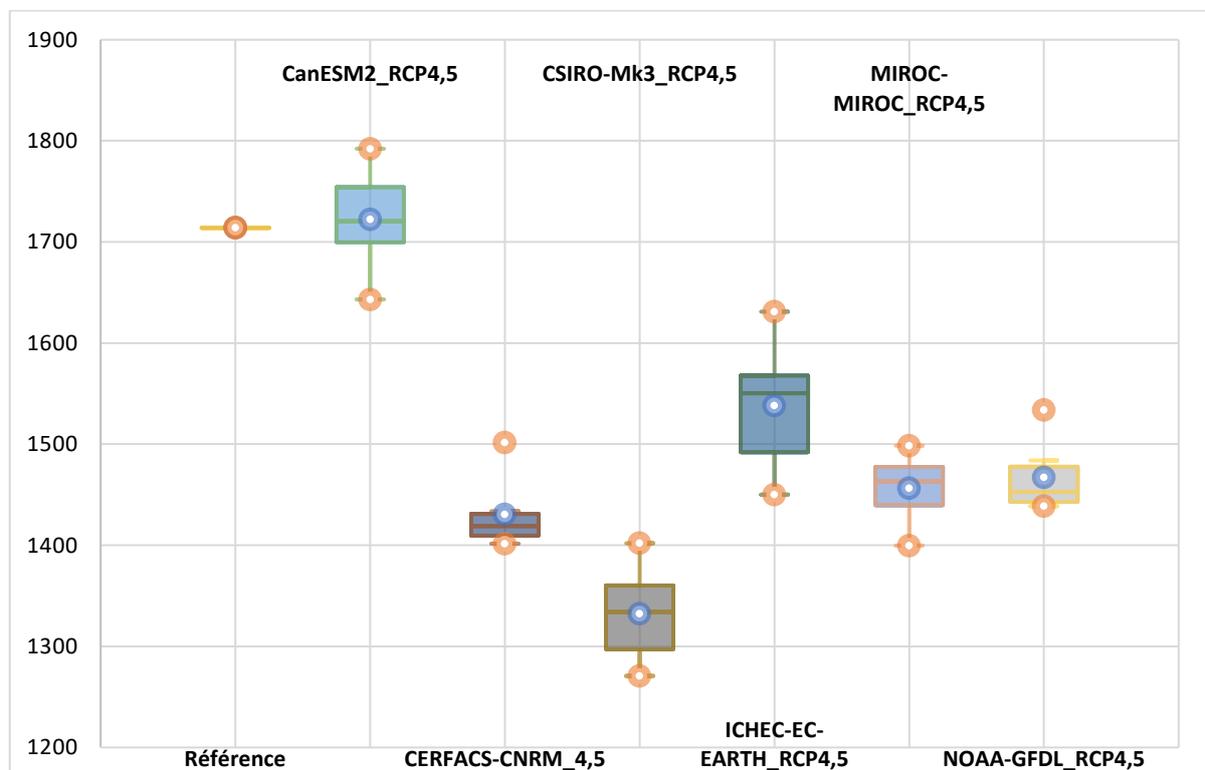


Figure 20 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Mbandaka

La figure 20 ci-haut indique qu'à la station de Mbandaka, seul le modèle climatique CanESM2 prévoit une augmentation, non significative, des précipitations de l'ordre de 0.5 % par rapport à la période de référence. Les cinq autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, ICHEC-EC-EARTH, MIROC-MIROC et NOAA-GFDL) prédisent une diminution des précipitations de l'ordre de 10 à 22 % par rapport à la période de référence.

Tel que mentionné ci-dessus, le modèle optimiste CanESM2 prévoit une augmentation moyenne des précipitations de moins de 1%, et la décennie 2051-2060 sera la mieux arrosée

avec près de 5% d'augmentation des pluies par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 4).

Le modèle le plus pessimiste CSIRO prédit une diminution moyenne des précipitations de 22%, et la décennie 2091-2100 sera la plus sèche avec un déficit des précipitations de l'ordre de 26 % par rapport à la période de référence.

4.2.5. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BUTEMBO

La figure 21 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Butembo en République démocratique du Congo.

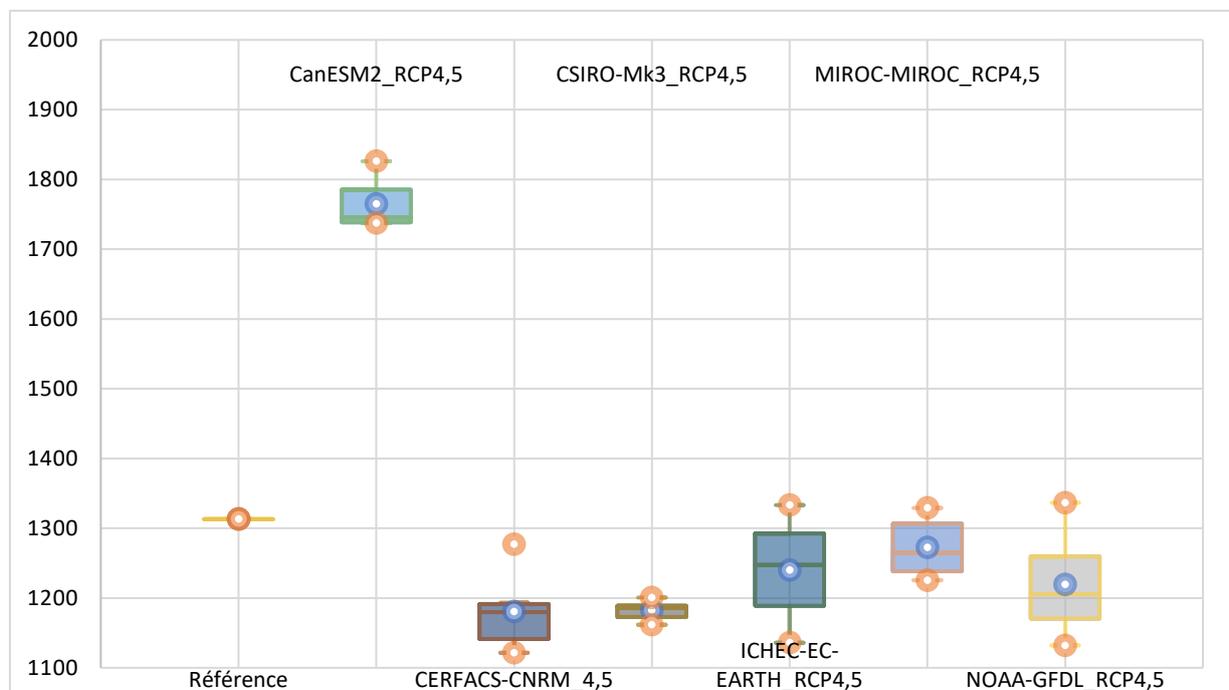


Figure 21 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Butembo

A la figure 21 ci-dessus, il est indiqué qu'à la station de Butembo, le modèle climatique CanESM2 prévoit une augmentation significative des précipitations de l'ordre de 34 % par rapport à la période de référence. Les cinq autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, ICHEC-EC-EARTH, MIROC-MIROC et NOAA-GFDL) prédisent une diminution des précipitations de l'ordre de 3 à 10% par rapport à la période de référence.

Le modèle optimiste CanESM2 prévoit donc une augmentation moyenne des précipitations de près de 34%, et la décennie 2071-2080 sera la mieux arrosée avec près de 39% d'augmentation des précipitations par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 5).

Le modèle le plus pessimiste CERFACS-CNRM prédit une diminution moyenne des précipitations de 10%, et la décennie 2091-2100 sera la plus déficitaire, avec une diminution des précipitations de près de 15% par rapport à la période de référence.

4.2.6. EVOLUTION FUTURE DES PLUIES A LA STATION DE BAMBESA

La figure 22 ci-dessous présente les distributions décennales de la pluviométrie future issue de l'application des modèles climatiques globaux à la station de Bambesa en République démocratique du Congo.

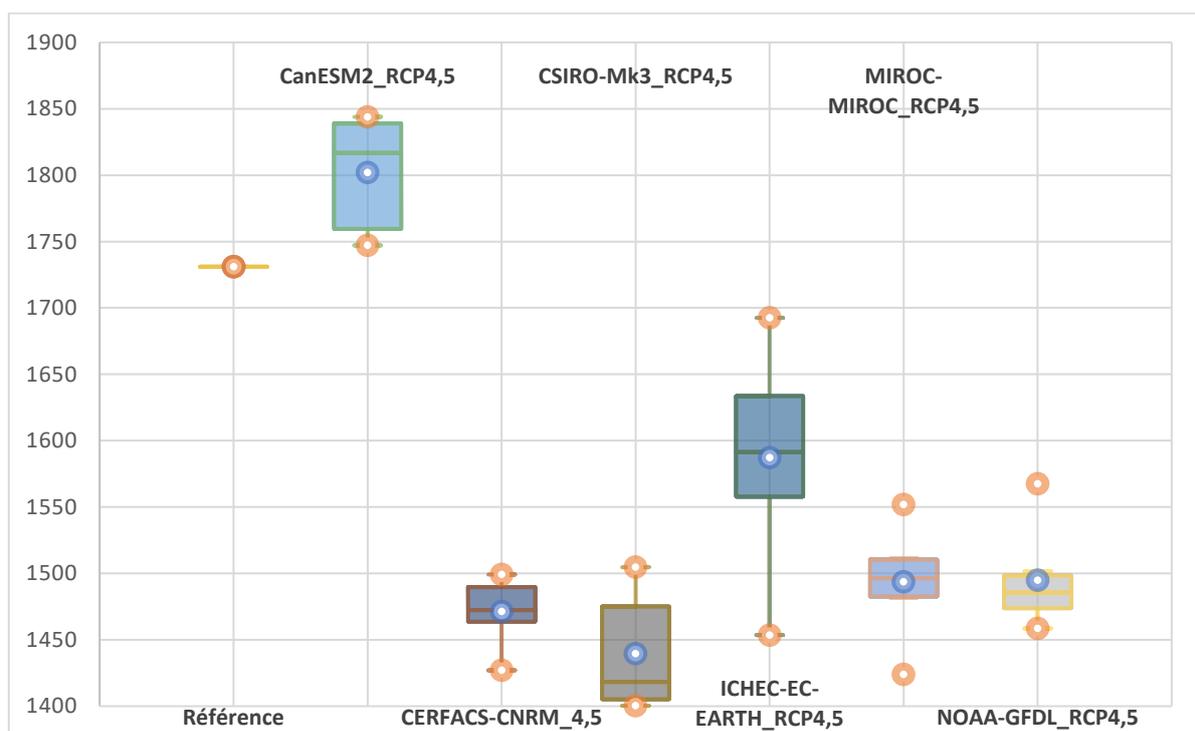


Figure 22 : Distributions décennales de la pluviométrie future à la station de Bambesa

La figure 22 ci-dessus indique qu'à la station de Bambesa, seul le modèle climatique CanESM2 prévoit une augmentation significative des précipitations de l'ordre de 4 % par rapport à la période de référence. Les cinq autres modèles climatiques (CERFACS-CNRM, CSIRO-Mk3, ICHEC-EC-EARTH, MIROC-MIROC et NOAA-GFDL) prédisent une diminution des précipitations de l'ordre de 8 à 17% par rapport à la période de référence.

Tel que signifié ci-dessus, le modèle optimiste CanESM2 prévoit donc une augmentation moyenne des précipitations de près de 4%, et la décennie 2081-2090 sera la mieux arrosée avec près de 7% d'augmentation des précipitations par rapport à la période de référence (voir ANNEXE 6).

Le modèle le plus pessimiste CSIRO-Mk3 prédit une diminution moyenne des précipitations de 17%, et la décennie 2091-2100 sera la plus déficitaire, avec une diminution des précipitations de plus de 19% par rapport à la période de référence.

4.3. DISCUSSION

Le régime pluviométrique moyen de l'ensemble de la région d'étude a connu une alternance de périodes humides et sèches au cours des décennies 1960 - 1970, 1971-1980, 1981-1990 et 1991-2000 (Dacosta et al., 2002 ; Descroix et al., 2009 ; Mahé et al., 2013), avec une tendance générale à la baisse des précipitations annuelles. Le déficit pluviométrique qui s'est amorcé dans le Sahel, tel que l'analyse des stations d'Abeche, Ndjamena et Bara l'on démontré, s'est accompagné d'un dessèchement de la zone soudano-sahélienne qui s'est traduit par un épuisement des eaux superficielles (Frappart et al., 2009).

En effet, le caractère déficitaire des précipitations a pris progressivement de l'ampleur, et l'insécurité alimentaire et le manque de pâturage qui en ont résulté se sont traduits par des déplacements de population et de leurs troupeaux vers les régions plus humides, au sud, créant les conditions d'une instabilité sociopolitique clairement manifeste (de Waal, 1997).

D'un autre côté, l'analyse des précipitations dans le bassin du fleuve Congo, notamment les stations de la partie Nord du bassin (Mbandaka, Butembo, Ifondo, et Bangui) démontre une tendance générale décroissante des pluies annuelles depuis les décennies 60 et 70 (Amy, 2019). A la différence des autres stations du bassin, la station de Bambesa présente une variabilité pluviométrique annuelle beaucoup plus modérée, et la tendance à la baisse y est moins perceptible.

En dépit des longues périodes de sécheresse observée dans la partie nord de la région d'étude (bassin du Lac Tchad), on y observe finalement un retour aux conditions humides à partir de la fin des années 90 et le début des années 2000, tel que le rapportent également Paturel et al. (2002) et L'Hôte et al. (2002 et 2003). Par exemple, il est observé sur les stations d'Abeche, Ndjamena, Yao et Bara des moyennes pluviométriques respectives de 497 mm, 561 mm et 1018 mm, soit 14 %, 5 % et 3%, des totaux pluviométriques supérieurs aux normales climatiques de 1961 à 1990. Cela est confirmé par Goudoum et Lemoalle (2014), qui ont observé, par une analyse fine des données du satellite Landsat, que la cuvette nord du bassin du Lac Tchad a été mieux alimentée et la surface totale du lac est redevenue plus importante avec une moyenne de 8 000 à 10 000 km² à partir de la fin des années 1990.

Quant à l'analyse des prévisions climatiques futures, les résultats des sorties des précipitations pour les six modèles climatiques appliqués sous influence du scénario RCP 4.5 permettent de constater que les stations de la région nord de la zone d'étude connaissent au minimum deux modèles qui prédisent l'augmentation significative des précipitations dans cette région, et donc une probable diminution importante de la sécheresse et un retour aux conditions plus humides, favorables au développement des activités socioéconomiques et au maintien de la biodiversité. Tandis que pour les stations étudiées dans le bassin du Congo, la quasi-totalité des modèles prédisent une diminution drastique des précipitations, en dehors d'un seul modèle qui prédit une augmentation quasi faible des précipitations. Ceci correspond également aux résultats des analyses effectuées par Amy et al. (2019), dans leur étude de la saison sèche dans le contexte de changement climatique. La tendance la plus cohérente qui se dégage des modèles pour le bassin du Congo est une d'un léger mouillage à l'avenir, ce qui concorde parfaitement avec les résultats d'Aloysius et al. (2016).

Cependant, il est à noter que les changements de précipitations modélisés dans les différents bassins versants en général, et dans le bassin du Congo en particulier. Il existe un désaccord entre les modèles en ce qui concerne l'ampleur et la configuration spatiale et temporelle des changements de précipitations lié à l'incertitude des modèles. Des travaux antérieurs sur les mécanismes de changement des précipitations tropicales réalisés par Chadwick et al. (2013), Kent et al. (2015) et Lazenby et al. (2018), cités par Amy et al. (2019), suggèrent que l'incertitude intermodèle provient principalement de l'incertitude dans la réponse dynamique au réchauffement. Une telle réponse dynamique peut inclure des changements dans le mouvement vertical et horizontal.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'importance des études hydroclimatiques pour amorcer la gestion et le développement ressources naturelles des bassins versants n'est plus à démontrer. Cette étude, qui s'inscrit dans le cadre d'une analyse holistique des interactions existant entre les migrations et les conflits liés au changement climatique et à l'eau dans le Bassin du Congo, avait pour but de caractériser la variabilité climatique par l'identification des modes de distribution des facteurs hydroclimatiques, notamment les paramètres détection de ruptures de stationnarité ; analyser les tendances pluviométriques susceptibles d'avoir des impacts positifs ou négatifs sur les ressources en eau et les activités humaines dans la région d'étude ; et analyser les fluctuations futures des facteurs climatiques en vue de prévoir les conséquences et les implications sur les ressources en eau et les services écosystémiques dans un contexte de pressions anthropiques.

Pour y arriver, plusieurs approches méthodologiques ont été intégrées, allant de l'analyse de la variabilité des séries chronologiques par application des tests statistiques ; le développement des indices climatiques, notamment l'indice de l'indice pluviométrique et l'Indice Standardisé d'Evapotranspirations et de Précipitations ; l'analyse spatiale de la variabilité climatique ; et l'analyse des scénarios climatiques futures par l'utilisation des sorties des modèles climatiques globaux.

Il ressort de toutes ces analyses ce qui suit :

- La pluviométrie annuelle connaît une grande variabilité spatio-temporelle sur l'ensemble de la zone d'étude. De la décennie 50 à la décennie 90, toutes les stations étudiées ont montré une réelle tendance à la baisse des cumuls annuels des précipitations. Mais à partir des années 90, il s'est observé un renversement de situation sur certaines stations, particulièrement celles du Bassin du Lac Tchad, qui ont vu leur pluviométrie connaître une tendance à la hausse ;
- Les similitudes dans les tendances de la variation des précipitations sur la zone d'étude ont permis de classer six régions pluviométriques distinctes, par regroupement des stations présentant des similarités dans la variabilité de leurs précipitations respectives, et ses six régions ont été utilisées pour les analyses des scénarios futures ;

- Huit des dix stations étudiées ont connu une rupture de stationnarité dans leurs séries respectives, dont trois l'ont connue au cours de la décennie 1960, deux durant la décennie 1970, et tous autres au cours de la décennie 1980 ;
- Les fluctuations annuelles du SPEI traduisent l'existence la vulnérabilité de la zone d'étude à la sécheresse hydrologique, dont les impacts potentiels sont donc sur tous les secteurs de la vie de l'homme, mais également sur la biodiversité, à savoir : l'agriculture pluviale, la recharge des eaux souterraines, les débits et la vie socioéconomique dans son ensemble ;
- Dans une perspective régionale, la distribution spatio-temporelle des précipitations dans la zone d'étude révèle une diminution des précipitations à partir du mois de novembre et continue sa chute jusqu'au mois de février (mois secs). A partir du mois d'avril, il s'observe la montée de la ceinture des précipitations, qui se poursuit pour atteindre le pic au mois d'octobre (mois humides). Cette saisonnalité n'a donc pas été entamée par le changement climatique ;
- Les modèles climatiques globaux appliqués sous influence du scénario RCP 4.5 ont permis de constater que les stations de la région nord de la zone d'étude connaissent au minimum deux modèles qui prédisent l'augmentation significative des précipitations dans cette région, et donc une probable diminution importante de la sécheresse et un retour aux conditions plus humides, favorables au développement des activités socioéconomiques et au maintien de la biodiversité. Tandis que pour les stations étudiées dans le bassin du Congo, la quasi-totalité des modèles prédisent une diminution drastique des précipitations, sauf un seul modèle qui prédit une augmentation quasi faible des précipitations.

Eu égard à ce qui précède, au regard des défis climatiques et socio-économiques auxquels la zone d'étude est confrontée ; considérant que les variations spatio-temporelles du régime des pluies dans la zone d'étude ont certainement pu avoir un impact important sur le débit des cours d'eau, la reconstitution des réserves d'eau de surface et la recharge des nappes phréatiques, avec un impact potentiel sur l'approvisionnement en eau des ménages et du bétail, la production agricole et l'environnement, nous suggérons ce qui suit :

- Une évaluation de cet impact par une analyse de la sensibilité dans ce contexte de changement climatique ;
- Une analyse plus poussée des conditions climatiques passées, présentes et futures par l'application d'une approche statistique complémentaire qui consiste en une étude spatio-temporelle des données à l'aide des méthodes d'analyse exploratoire multidimensionnelle, en vue de comprendre l'évolution des facteurs climatiques sous plusieurs contraintes d'émissions de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 par exemple), et l'utilisation des modèles climatiques régionaux en vue d'affiner les résultats ;
- Le développement des indices de vulnérabilité physique au changement climatique dans la zone d'étude.

Ces suggestions peuvent être abordées dans le cadre des études scientifiques ultérieures, et des projets d'appui à la prise de décision de gestion et développement des ressources en eau des bassins versants concernés par cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Amy C., Washington R., Jones R., (2019). Climate change in the Congo Basin: processes related to wetting in the December–February dry season. *Climate Dynamics*, 53:3583–3602, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04728-x>.
- Ardoin-Bardin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de l'Université Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France 608 p.
- Baek, HJ., Lee J., Lee HS., Hyun YK, ChunHo C., Kwon WT., Marzin C., Gan SY., Kim MJ., Choi DH., Jonghwa L., Jaeho L., Boo KO., Kang HS., Byun YH. (2013). Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 49, 603–618 <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0053-7>
- Baines, P. G., and Folland C. K. (2007). Evidence for a Rapid Global Climate Shift across the Late 1960s. *J. Climate*, 20, pp. 2721–2744.
- Beguiría S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 34, 3001–3023.
- Béatrice Q. (2015). La vulnérabilité, un concept central de l'analyse des risques urbains en lien avec le changement climatique. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, PUCA Septembre (110).
- Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5, 180214
- Bouly S., Cisse A., Faye .C, Sane T. (2020). Utilisation de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 à 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la basse Casamance. *Révue Espace Géographique et Société Marocaine*, N°32, février 2020.

- Chadwick R, Boutle I, Martin G (2013). Spatial patterns of precipitation change in CMIP5: why the rich do not get richer in the tropics. *J Clim* 26:3803–3822.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00543.1>
- Christensen, J.H., Christensen, O.B. (2007) A summary of the prudence model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81, pp. 7–30.
- Dacosta H., Kandia K.Y., Malou R. (2002). La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. *Regional hydrology: bridging the gap between Research and Practice (Proceedings of the Fourth international FRIEND conference held at Cap Town, South Africa, March 2002)*, IAHS Publ., 274 : 499-506.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J-C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I., Sighomnou D., (2009). Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, Volume 375, Issues 1–2, 2009, Pages 90-102, ISSN 0022-1694.
- de Waal, F. B. M., (1997). Food transfers through mesh in brown capuchins. *Journal of Comparative Psychology*, 111(4), 370–378.
- Drobinski P., Sultan B., and Janicot S. (2005). Role of the Hoggar massif in the West African monsoon onset. *Geophysical Research Letters*, Volume 32, L01705, 5 p.
- Faye, C., & Mendy, A. (2018). Climatic Variability and Hydrological Impacts in West Africa: Case of the Gambia Watershed (Senegal). *EWASH&TI journal*, vol2, pp. 54-66.
- Feizouré, C. (1994). Conséquences de la variabilité hydroclimatique sur l'érosion dans le bassin de l'Oubangui (République Centrafricaine). *Mém. DEA, Univ. Bourgogne, Dijon; Laboratoire d'Hydrologie, Orstom, Bangui.*
- Frappart F., Hiernaux P., Guichard F., Mougou E., Kergoat L., Arjounin M., Lavenu F., Koite M., Paturol J.-E. et Lebel T., (2009). Rainfall regime across the Sahelian band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375, 128-142.

- Folland, C., Palmer, T. and Parker, D. (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901–85. *Nature* 320, pp. 602–607.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066.
- Fussler, H., & Klein, R. (2002). *Vulnerability and Adaptation Assessments to Climate*. UNDP
- Giannini A., Saravanan R. and Chang P. (2003). Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales, *Science* 07, Vol. 302, Issue 5647, pp. 1027-1030.
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Grodsky, S.A., Carton, J., & Murtugudde, R. (2001). Anomalous surface currents in the tropical Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 28, pp. 4207-4210.
- Heinzeller, D., Dieng, D., Smiatek, G., Olusegun, C., Klein, C., Hamann, I., Salack, S., Bliedernicht, J., and Kunstmann, H., (2018): The WASCAL high-resolution regional climate simulation ensemble for West Africa: concept, dissemination and assessment, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 815-835, <https://doi.org/10.5194/essd-10-815-2018>.
- Imogen J., Canadell P., Martin D.
- IPCC. in *Climate Change (2013). Phys. Sci. Basis. Contrib. Work. Gr. I to Fifth Assess. Rep.* Intergov. Panel Clim. Chang. (Stocker, T. F. et al.) (Cambridge University Press, 2013).
- Kyle L. Swanson, George Sugihara, Anastasios A. (2009). Long-term natural variability and 20th century climate change. *Tsonis Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (38) 16120-16123; <https://doi.org/10.1073/pnas.0908699106>.
- Kent C, Chadwick R, Rowell DP (2015). Understanding uncertainties in future projections of

seasonal tropical precipitation. J Clim. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00613.1>

Lazenby MJ, Todd MC, Chadwick R, Wang Y (2018) Future precipitation projections over central and southern Africa and the adjacent Indian Ocean: what causes the changes and the uncertainty? J Clim. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0311.1>

Lienou, G. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun . Montpellier: Université de Montpellier I, 486 p.

L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 47(4), 563-572.

L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B. (2003). The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 48(3), 493-496.

Ly, M., Segnon, A.C., D'haen, S., Totin, E., Noblet, M., Camara, I., Pflleiderer, P. (2019). Comprendre et interpreter les sorties des modeles climatiques pour la conduite des etudes de vulnerabilite: Guide a l'attention des praticiens. Climate Analytics gGmbH, Berlin

Mahé J. et al., (2013). The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment, Hydrological Processes, 27, 2106-2114.

Mara, F. (2010). Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéniennes face à la variabilité du climat: Le cas de la ressource en eau dans la vallée de la Sirba/ Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université du Quebec/Montreal, 250 p.

Mathilde Closset, Sosso Feindouno, Patrick Guillaumont, Catherine Simonet. A Physical Vulnerability to Climate Change Index: Which are the most vulnerable developing countries? (2017). hal- 01719925v3.

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., . . .

- van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- Moss RH., Edmonds JA., Hibbard KA., Manning MR., Rose SK., van Vuuren DP., Carter TR., Emori S., Kainuma M., Kram T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756.
- Mitchell TD, Jones PD. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol* 25(6):693–712.
- Mkankam Kanga, F. (2000). Validation of general circulation climate models and projections of temperature and rainfall changes in Cameroon and some of its neighboring areas; *Theoretical and Applied Climatology*, 67, 1, pp. 97-107.
- Mpounza M. et Samba-Kimbata M.J., (1990). Aperçu sur le climat de l’Afrique centrale occidentale. In : Lanfranchi R. and Schwartz D. (eds.), *Paysages quaternaires de l’Afrique centrale atlantique*. ORSTOM, Paris, pp. 31-41.
- Nicholson, S. E., Some B., Kone B. (1999). An Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa, Including the Rainy Seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña Years, *Journal of climat*, 13, pp. 2628–2640.
- Nicholson, S. E., (1994). Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationships to past conditions over the continent. *The Holocene*, 4, pp. 121-131.
- Nicholson, S. E., (1979). Statistical typing of rainfall anomalies in sub-Saharan Africa. *Erdkunde*, 33, pp. 95-103.
- OMM, (2015). *Climat de l'Afrique en 2013*. Édit. Organisation Météorologique Mondiale, numéro 1147, Genève (Suisse), 32 p.
- Paturel, J.E., Koukponou, P., Ouattara, F., L’Aour, A., Mahé, G., Crès J.F. (2002). Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXeme siècle. *Sud Sciences*

Technologies 8, 41-49.

Pettitt, A. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28(2), pp. 126–135.

PNUD, (2011). *Formuler des scénarios climatiques pour éclairer les stratégies de développement résilient au climat : Guide à l'intention des praticiens.*

Ramel, R., Gallée, H. & Messenger, C. (2006). On the northward shift of the West African monsoon. *Clim Dyn* 26, pp. 429–440.

Schreck III, C. J., K. R. Knapp, and J. P. Kossin, (2014). The Impact of Best Track Discrepancies on Global Tropical Cyclone Climatologies using IBTrACS Monthly Weather Review, 142, 3881-3899

Sijikumar S., Roucou P., Fontaine B. (2006). Monsoon onset over Sudan-Sahel: Simulation by the regional scale model MM5. *Geophysical Research Letters*, Volume 33, L03814, 4 p.

Sultan, B., S. Janicot, and A. Diedhiou, (2003). The West African Monsoon Dynamics. Part I: Documentation of Intraseasonal Variability. *J. Climate*, 16, pp. 3389–3406.

Taylor KE., Ronald JS., Gerald AM. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485–498. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Tsalefac M., Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D., Scholte P., Pokam W., Haensler A., Beyene T., Ludwig F., Mkankam F., Manetsa V., Ndjatsana M., Doumenge C. (2015). *Les forêts du Bassin du Congo - Forêts et changements climatiques.* Weyrich Ed. Edited by C. de Wasseige C., Tadoum M., Eba'a Atyi R. et Doumenge. Neufchâteau : OFAC/COMIFAC.

Thornthwaite C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 55–94.

Tshimanga, M.R. (2012). Hydrological uncertainty analysis and scenario-based streamflow

odeling for the Congo River Basin. Online PhD thesis, www.ru.ac.za, Rhodes University, South Africa.

Washington R., James R., Pearce H. (2013). Congo Basin rainfall climatology: can we believe the climate models? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 368:20120296. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0296>.

ZIERVOGEL, G., ZERMOGLIO, F. (2009). Climate-change scenarios and the development of adaptation strategies in Africa: challenges and opportunities, *Climate Research*, 40, 133-46. 'Climate-change scenarios and the development of adaptation strategies in Africa: challenges and opportunities' *Climate Research* 40 133 46

ANNEXES

SORTIES DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX

ANNEXE 1 : STATION DE NDJAMENA

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	589,38253	518,8229426	511,41651	486,0562632	595,7609797	558,9763638
2051-2060	674,72338	554,269796	495,215608	474,301113	656,8028498	665,5478316
2061-2070	722,63517	586,1115311	539,882481	543,2648682	623,2754134	536,8089486
2071-2080	676,88768	588,9492076	475,614434	522,9344075	655,0473041	521,0963591
2081-2090	686,44769	523,2619765	531,335629	523,8730284	626,9654248	505,160796
2091-2100	690,20678	497,2500874	552,625577	418,6236148	610,2129232	579,4656263

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	616,000	589,383	497,250	475,614	418,624	595,761	505,161
Maximum	616,000	722,635	588,949	552,626	543,265	656,803	665,548
1er Quartile	616,000	675,264	519,933	499,266	477,240	613,479	525,025
Médiane	616,000	681,668	538,766	521,376	504,495	625,120	547,893
3ème Quartile	616,000	689,267	578,151	537,746	523,638	648,027	574,343
Moyenne	616,000	673,381	544,778	517,682	494,842	628,011	561,176
Variance (n-1)	0,000	1989,932	1429,031	842,802	2057,024	588,057	3314,132
Ecart-type (n)	0,000	40,722	34,509	26,502	41,403	22,137	52,553
Ecart-type (n-1)	0,000	44,609	37,803	29,031	45,354	24,250	57,569
Ecart-type de la moyenne	0,000	18,211	15,433	11,852	18,516	9,900	23,502

ANNEXE 2 : STATION DE BARA

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	1374,05057	899,272657	918,210563	899,766791	1021,20683	930,23883
2051-2060	1318,78599	947,570034	910,507104	952,546769	1041,09277	919,321537
2061-2070	1365,2639	985,543957	925,20943	1004,26529	1141,97788	875,751837
2071-2080	1474,47281	1046,13687	920,019377	903,1158	1169,28243	937,445192
2081-2090	1325,22767	885,021416	943,015955	901,159976	1038,81512	928,62987
2091-2100	1431,01425	981,006535	913,379512	856,640243	1069,33946	1040,19311

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	1061,000	1318,786	885,021	910,507	856,640	1021,207	875,752
Maximum	1061,000	1474,473	1046,137	943,016	1004,265	1169,282	1040,193
1er Quartile	1061,000	1335,237	911,347	914,587	900,115	1039,385	921,649
Médiane	1061,000	1369,657	964,288	919,115	902,138	1055,216	929,434
3ème Quartile	1061,000	1416,773	984,410	923,912	940,189	1123,818	935,644
Moyenne	1061,000	1381,469	957,425	921,724	919,582	1080,286	938,597
Variance (n-1)	0,000	3702,865	3587,531	135,239	2644,550	3718,474	2962,671
Ecart-type (n)	0,000	55,549	54,677	10,616	46,945	55,666	49,688
Ecart-type (n-1)	0,000	60,851	59,896	11,629	51,425	60,979	54,430
Ecart-type de la moyenne	0,000	24,842	24,452	4,748	20,994	24,895	22,221

ANNEXE 3 : STATION DE BATOURI

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	1476,4616	1332,16615	1245,4175	1333,2618	1355,7307	1404,93603
2051-2060	1577,45918	1364,86207	1226,33812	1472,75859	1360,05477	1445,9217
2061-2070	1506,83695	1433,33121	1233,74833	1389,48812	1303,42891	1411,49007
2071-2080	1443,29764	1257,21323	1287,64456	1374,74507	1349,37908	1330,01544
2081-2090	1503,99563	1261,24469	1258,45733	1397,87392	1352,85746	1385,91354
2091-2100	1463,10777	1289,81821	1239,77097	1308,15061	1286,22501	1343,66614

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	1344,000	1443,298	1257,213	1226,338	1308,151	1286,225	1330,015
Maximum	1344,000	1577,459	1433,331	1287,645	1472,759	1360,055	1445,922
1er Quartile	1344,000	1466,446	1268,388	1235,254	1343,633	1314,916	1354,228
Médiane	1344,000	1490,229	1310,992	1242,594	1382,117	1351,118	1395,425
3ème Quartile	1344,000	1506,127	1356,688	1255,197	1395,777	1355,012	1409,852
Moyenne	1344,000	1495,193	1323,106	1248,563	1379,380	1334,613	1386,990
Variance (n-1)	0,000	2210,850	4650,402	485,176	3277,152	991,597	1903,895
Ecart-type (n)	0,000	42,923	62,252	20,108	52,259	28,746	39,832
Ecart-type (n-1)	0,000	47,020	68,194	22,027	57,246	31,490	43,634
Ecart-type de la moyenne	0,000	19,196	27,840	8,992	23,371	12,856	17,813

ANNEXE 4 : STATION DE MBANDAKA

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	1643,15197	1433,74941	1314,22631	1473,42595	1473,52179	1441,57818
2051-2060	1792,24767	1401,61702	1353,74724	1631,03745	1435,43742	1438,61458
2061-2070	1720,99071	1407,88946	1362,34789	1552,81352	1452,61747	1446,86171
2071-2080	1693,0766	1423,31968	1291,53024	1548,16298	1399,70397	1533,75236
2081-2090	1765,15344	1501,50386	1402,04376	1572,80108	1498,46869	1483,88547
2091-2100	1720,05283	1414,61851	1270,76263	1450,11029	1478,80602	1458,71909

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	1714,000	1643,152	1401,617	1270,763	1450,110	1399,704	1438,615
Maximum	1714,000	1792,248	1501,504	1402,044	1631,037	1498,469	1533,752
1er Quartile	1714,000	1699,821	1409,572	1297,204	1492,110	1439,732	1442,899
Médiane	1714,000	1720,522	1418,969	1333,987	1550,488	1463,070	1452,790
3ème Quartile	1714,000	1754,113	1431,142	1360,198	1567,804	1477,485	1477,594
Moyenne	1714,000	1722,446	1430,450	1332,443	1538,059	1456,426	1467,235
Variance (n-1)	0,000	2770,830	1340,267	2400,522	4416,839	1246,627	1333,358
Ecart-type (n)	0,000	48,052	33,420	44,726	60,669	32,231	33,334
Ecart-type (n-1)	0,000	52,639	36,610	48,995	66,459	35,308	36,515
Ecart-type de la moyenne	0,000	21,490	14,946	20,002	27,132	14,414	14,907

ANNEXE 5 : STATION DE BUTEMBO

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	1737,30492	1185,55761	1168,80471	1135,93034	1317,44091	1207,30756
2051-2060	1737,34786	1193,4099	1185,26896	1333,24641	1232,4952	1132,18052
2061-2070	1748,33549	1276,87704	1200,78161	1297,08206	1256,82724	1159,64926
2071-2080	1826,13189	1174,16407	1187,4288	1179,77718	1273,08777	1203,96083
2081-2090	1742,27289	1130,50789	1161,7692	1277,94335	1329,13616	1336,66351
2091-2100	1797,41174	1121,52098	1189,1589	1217,15154	1225,52441	1277,00694

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2_RCP4,5	CERFACS-CNRM_4,5	CSIRO-Mk3_RCP4,5	ICHEC-EC-EARTH_RCP4,5	MIROC-MIROC_RCP4,5	NOAA-GFDL_RCP4,5
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	1313,000	1737,305	1121,521	1161,769	1135,930	1225,524	1132,181
Maximum	1313,000	1826,132	1276,877	1200,782	1333,246	1329,136	1336,664
1er Quartile	1313,000	1738,579	1141,422	1172,921	1189,121	1238,578	1170,727
Médiane	1313,000	1745,304	1179,861	1186,349	1247,547	1264,958	1205,634
3ème Quartile	1313,000	1785,143	1191,447	1188,726	1292,297	1306,353	1259,582
Moyenne	1313,000	1764,801	1180,340	1182,202	1240,188	1272,419	1219,461
Variance (n-1)	0,000	1422,655	3099,701	205,463	5674,415	1856,074	5726,250
Ecart-type (n)	0,000	34,432	50,824	13,085	68,765	39,328	69,079
Ecart-type (n-1)	0,000	37,718	55,675	14,334	75,329	43,082	75,672
Ecart-type de la moyenne	0,000	15,398	22,729	5,852	30,753	17,588	30,893

ANNEXE 6 : STATION DE BAMBESA

Période	CanESM2	CERFACS-CNRM	CSIRO-Mk3	ICHEC-EC-EARTH	MIROC-MIROC	NOAA-GFDL
2041-2050	1747,08788	1499,1723	1504,7085	1453,59545	1551,86619	1488,21718
2051-2060	1838,94082	1462,07318	1400,37415	1692,54581	1485,92318	1483,06999
2061-2070	1838,81842	1494,40577	1424,22513	1577,05287	1481,68437	1458,56702
2071-2080	1747,85801	1475,48778	1403,03583	1642,81998	1506,81587	1470,8237
2081-2090	1843,90579	1427,03414	1491,99116	1605,55013	1511,51736	1501,69432
2091-2100	1794,52077	1469,03666	1412,50591	1551,58547	1423,86952	1567,42399

Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Référence	CanESM2_RCP4,5	CERFACS-CNRM_4,5	CSIRO-Mk3_RCP4,5	ICHEC-EC-EARTH_RCP4,5	MIROC-MIROC_RCP4,5	NOAA-GFDL_RCP4,5
Nb. d'observations	6	6	6	6	6	6	6
Minimum	1731,000	1747,088	1427,034	1400,374	1453,595	1423,870	1458,567
Maximum	1731,000	1843,906	1499,172	1504,709	1692,546	1551,866	1567,424
1er Quartile	1731,000	1759,524	1463,814	1405,403	1557,952	1482,744	1473,885
Médiane	1731,000	1816,670	1472,262	1418,366	1591,301	1496,370	1485,644
3ème Quartile	1731,000	1838,910	1489,676	1475,050	1633,503	1510,342	1498,325
Moyenne	1731,000	1801,855	1471,202	1439,473	1587,192	1493,613	1494,966
Variance (n-1)	0,000	2095,765	675,589	2165,987	6749,917	1790,779	1478,046
Ecart-type (n)	0,000	41,791	23,727	42,485	75,000	38,631	35,096
Ecart-type (n-1)	0,000	45,780	25,992	46,540	82,158	42,318	38,445
Ecart-type de la moyenne	0,000	18,689	10,611	19,000	33,541	17,276	15,695