

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE 1

ECOLE NORMALE SUPERIEURE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE 1

HIGHER TEACHER'S TRAINING
COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR
LES INDICES HYDROLOGIQUES**

Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de

Professeur de l'Enseignement Secondaire Deuxième grade

(DIPES II)

Par :

NJITACK TAMO Dimitri

Matricule : 13J2126

Licencié en physique

Sous la direction de :

Dr. POKAM MBA Wilfried

Chargé de Cours ENS/UY1

Année Académique 2018-2019

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INDICES HYDROLOGIQUES

Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du DIPES II

NJITACK TAMO Dimitri

Département de Physique

Licencié ès Physiques

Matricule : 13J2126

Sous la direction de

POKAM MBA Wilfried

Chargé de cours

Université de Yaoundé I

Année Académique 2018/2019

Juin 2019

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents TAMO et MEWA ANNETHÉ pour qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de toute mon affection pour l'effort qu'ils n'ont cessé de consentir.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent :

- √ À Dieu le maître de toute chose qui, m'a donné le souffle de vie et qui a permis que ce travail arrive à terme.
- √ A mon directeur de mémoire le Dr POKAM MBA Wilfried qui a accepté de me diriger dans ce travail et qui m'a appris en un laps de temps les bases de la physique de l'atmosphère.
- √ Toute ma gratitude va à l'endroit de tous les enseignants du département de physique et chimie de l'école normale supérieure de Yaoundé pour leur encadrement pendant tous les deux années passées dans cette institution.
- √ Aux aînées du laboratoire de physique de l'atmosphère, télédétection et climatologie de l'université de Yaoundé 1, et particulièrement KUETE Giresse qui m'a enseigné l'utilisation du langage de programmation NCL qui m'a permis de mieux aborder ce travail et pour son encouragement.
- √ A mes grandes sœurs TAKOU Vanissa, MEKOAGNE Merline, MEGNE Line, KAPOHO Rosine et à mes frères SOP Berthelot, KOAGNE Silas. Je vous dis sincèrement merci pour votre soutien inconditionnel et votre patience à mon égard.
- √ Je pense à tous mes amis plus particulièrement à MOMO Fanck, BOUENTOU Bolivard, FAKOUO Ibrahim, DIFFO Hermann, AOUTACKSA Arsene, NGAZING Cabrel pour leur encouragement.
- √ Enfin, ma famille et mes amis que je ne peux remercier nommément, ainsi que ceux que ma mémoire a pu ingratement oublier, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Table des matières	ii
Résumé	vi
Abstract	vii
Liste des abréviations	viii
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Contexte climatique générale	3
1.2 Dynamique atmosphérique	5
1.3 Caractéristiques générales des précipitations en Afrique Centrale	6
1.4 Généralités sur la sècheresse	7
1.4.1 Définition de la sècheresse	7
1.4.2 La sécheresse agricole	8
1.4.3 La sécheresse météorologiques	8
1.4.4 La sécheresse hydrologique	8

1.5	Rappel sur le cycle de l'eau	8
1.6	Description du climat actuel et variation des régimes hydrologiques	9
1.7	Quelques problèmes relatifs au suivi du climat en Afrique centrale	10
1.7.1	L'observation du climat en Afrique centrale	10
1.7.2	Stratégies élaborées par les pays et institutions régionales pour améliorer la disponibilité des données climatiques.	11

CHAPITRE 2 : DOMAINE D'ÉTUDE , DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

13

2.1	Description et localisation de la zone d'étude	13
2.2	Données utilisées	13
2.2.1	Tropical Rainfall Measuring Mission	14
2.2.2	Global Precipitation Climatology Project	14
2.2.3	Matériel utilisé	15
2.3	Méthodologie	15
2.3.1	Indice Normalisé des précipitations (INP)	15
2.3.2	Palmer Drought Severity Index (PDSI)	16
2.3.3	Bref aperçu de la procédure Palmer	17
2.3.4	Une méthode pour calibrer le PDSI	19

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 22

3.1	Analyse des deux jeux de données	22
3.1.1	Cycle annuel des précipitations	22
3.1.2	Variabilité spatiale des précipitations	23
3.1.3	Variabilité interannuelle des précipitations	25
3.2	Analyse de l'indice normalisé des précipitations (INP)	27
3.2.1	Distribution spatiale de l'indice normalisé des précipitations	29
3.3	Étude de la baisse de précipitations sur Palmer Drought Severity Index (PDSI)	31
3.3.1	Étude de la variabilité annuelle du PDSI	31
3.3.2	distribution spatiale du PDSI	32
3.3.3	Tendance spatiale du PDSI	33

3.4	Impacts de la sécheresse hydrologique dans les grands fleuves	34
3.4.1	Production d 'hydroélectricité	34
3.4.2	Navigation commerciale	34
3.4.3	Santé publique	34
3.4.4	Température d'eau	35
CHAPITRE 4 : IMPLICATIONS PEDAGOGIQUES		36
4.1	DEFINITION DES CONCEPTS	36
4.2	Intérêt didactique	36
4.3	Apports chez les enseignants.	37
4.4	Apports chez les élèves.	38
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		39
Bibliographie		41

RÉSUMÉ

Cette étude s'appuie sur des précipitations enregistrées en Afrique Centrale pour la saison Avril-Mai-Juin au cours de la période 1998- 2013. Les séries pluviométriques issues des données TRMM et GPCP ont permis d'étudier l'évolution spatio-temporelle et la variabilité interannuelle de la pluviométrie en Afrique centrale. Les résultats soulignent l'existence d'une alternance de périodes sèches et humides. Ils mettent également en évidence une diminution de la moyenne saisonnière AMJ de la pluviométrie en Afrique centrale. Une étude statistique, confirmée par des représentations cartographiques sur la période 1998-2013, met en évidence le caractère fortement hétérogène du phénomène dans l'espace. Cette diminution de la pluviométrie a de sérieuses conséquences sur l'hydrologie dans la sous-région Afrique centrale. Cette étude a permis de caractériser ces conséquences et d'apporter une dimension régionale à leur interprétation, en soulignant la conséquence probable de la diminution importante des débits, ce qui n'est pas sans conséquences tant au niveau économique qu'environnemental.

MOTS-CLES : Afrique Centrale - Régimes pluviométriques - Régimes hydrologiques - Variabilité climatique

ABSTRACT

This study is based on rainfall recorded in Central Africa for the April-May-June season during the period 1998-2013. Rainfall series derived from TRMM and GPCP data allowed to study spatio-temporal evolution and Interannual variability Rainfall in Central Africa. The results highlight the existence of alternating dry and wet periods. They also highlight a decrease in the seasonal mean AMJ of rainfall in Central Africa. A statistical study, confirmed by cartographic representations of the period 1998-2013, highlights the highly heterogeneous nature of the phenomenon in space. This decrease in rainfall has serious consequences for hydrology in the Central African sub region. This study made it possible to characterize these consequences and to bring a regional dimension to their interpretation, underlining the probable consequence of the significant reduction of flows, which is not without consequences both economically and environmentally.

KEY-WORDS : Central Africa - Pluviometry regimes - Flow regimes - Climatic variability

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AEC	: Afrique Equatorial centrale.
AMJ	: Avril-Mai-Juin.
ASECNA	: Agence pour le Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et en Madagascar.
BAD	: Banque Africaine de Développement.
CAFEC	: Condition Appropriées du point de vue Climatique pour les Conditions Existantes.
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique.
ClimDev	: Programme Climatique pour le Développement.
COMIFAC	: Commission des Forets d'Afrique Centrale.
FIT	: Font Inter Tropical.
FSCD	: Font Spécial Africain ClimDev.
GCOS	: Système d'Observation du Climat Mondial.
GPCP	: Global Precipitation Climatologie Project
GTS	: Système Mondiale de Télécommunication de l'OMM.
INP	: Indice Normalisé des Précipitations.
MAM	: Mars-Avril-Mai.
MEDD	: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
MJJ	: Mai-Juin-Juillet.
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale.
PDSI	: Palmer Drought Severety Index
RTMR	: Réseau de Télécommunication Météorologique Régional.
SATCOM	: Télécommunication Satellitaire.
SIEREM	: Système d'informations Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation.
SOM	: Septembre-Octobre-Novembre.
TRMM	: Tropical Rainfall Measuring Mission.

Liste des figures

Figure 1.1 : Classification climatique du Bassin du Congo selon le système KöppenGeiger [14], où Af = équatorial/humide, Am = tropical/mousson, Aw = tropical/hiver sec, BSh = semi-aride/chaud, BWh = aride/chaud, Cwa = tempéré chaud/hiver sec /été chaud, et Cwb = tempéré chaud/hiver sec/été tempéré.	4
Figure 1.2 : Coupe des cellules de Hadley de part et d'autre de l'équateur [15]	5
Figure 1.3 : Circulation de Walker [15]	6
Figure 1.4 : Schématisation du cycle de l'eau (Bulletin hydrologique du RNDE, disponible sur le site du MEDD www.ecologie.gouv.fr , d'après www.oieau.fr et www.inra.fr/Intranet/Projets/emergence/eau/fich_eau.htm).	9
Figure 2.1 : Localisation de la zone d'étude	14
Figure 3.1 : Cycle annuel des précipitations en mm /jour : pour A) la période de (1998-2013) du GPCP et pour en B) la période de (1998-2013) du TRMM.	23
Figure 3.2 : Distribution spatiale de précipitation moyenne temporelle d'AMJ en mm/jour : pour A) GPCP (1998-2013) et pour B) TRMM (1998-2013). La zone carrée indique la région d'étude.	24
Figure 3.3 : Variabilité interannuelle des précipitations moyennes pendant la saison AMJ des données GPCP (1998-2013).	26

Figure 3.4 : variabilité interannuelle des précipitations moyennes pendant la saison AMJ des données TRMM (1998-2013)	26
Figure 3.5 : Variabilité interannuelle des INP à partir des données GPCP et TRMM pendant la saison AMJ, sur la période 1998-2013.	28
Figure 3.6 : distribution spatiale du INP pour la saison AMJ des données GPCP durant les années (1998-2013). Le carré sur la figure représente notre zone d'étude.....	29
Figure 3.7 : Distribution spatiale du INP pour la saison AMJ des données TRMM pour la période (1998-2013).	30
Figure 3.8 : Variabilité interannuelle du Palmer Drought Severity Index pendant la saison (AMJ) pour la période 1998-2013.....	31
Figure 3.9 : Distribution spatiale du PDSI pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013. Le carré représenté sur la figure correspond à notre zone d'étude.....	32
Figure 3.10 : Tendances spatiales du PDSI pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013. Le carré trace dans la figure représente notre zone d'étude.	33

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Classification des séquences de sécheresse selon l'indice normalisé des précipitations (INP)	16
--	----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La notion de changement climatique global peut être définie comme une modification des caractéristiques climatiques, échelonnées sur une période allant de quelques décennies à plusieurs siècles. Ce changement climatique est sans équivoque et constitue l'enjeu majeur de notre siècle, ceci découle du consensus scientifique qui existe aujourd'hui autour des changements du climat de la planète. La convention cadre des nations unies sur le changement climatiques(CCNUCC) considère que l'évolution du climat ces dernières années est liée à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, avec comme principal moteur l'activité humaine. Les changements climatiques à cause de leurs impacts négatifs, potentiels et avérés sur les hommes et les écosystèmes préoccupent tous les pays du monde entier et encore plus de l'Afrique qui est reconnue comme une des régions les plus vulnérables et la moins productrice des gaz à effet de serre.

La tendance et la variabilité des précipitations en Afrique ont reçu beaucoup d'attention au cours des dernières décennies [1],[2]. Par exemple, de nombreuses études focalisées sur la sécheresse multi-décennale au Sahel [3], [4] ou le déclin de la pluie printanières sur la Corne de l'Afrique orientale [5],[6],[7]. Les caractéristiques pluviométriques interannuelles et multi-décennales sur Afrique australe ont également été détectés [8],[9].

L'Afrique Centrale, est la région la moins étudiée de L'Afrique et est une région qui a fait l'objet de moins d'investigation que d'autres [10]. Il y'a donc lieu de s'interroger sur les conséquences du changement climatique en Afrique Centrale, d'où la nécessité de bien caractériser le déficit pluviométrique de la sous région ainsi que les modifications associées sur les régimes hydrologiques.

L'objectif de notre étude est de caractériser la contribution du déficit de pluies sur les régimes hydrologiques.

Cette étude est subdivisée en quatre chapitres : Le chapitre 1 est consacré à la revue de littérature. Le chapitre 2 décrit la zone d'étude, les données utilisées et fait un bref résumé sur la méthodologie.

Le chapitre 3 présente les résultats obtenus et les interprétations faites sur ces derniers. Le chapitre 4 montre l'implication pédagogiques de notre étude dans le système éducatif camerounais. Ce travail s'achève par une conclusion générale et des perspectives envisagées.

REVUE DE LITTÉRATURE

Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les généralités sur le climat, de la dynamique atmosphérique et des caractéristiques générales des précipitations en Afrique Centrale. Nous décrirons le climat actuel, la variation des régimes hydrologiques et présenterons quelques problèmes relatifs au suivi du climat.

1.1 Contexte climatique générale

De par sa situation géographique, l'Afrique centrale présente une diversité de climats qui peuvent être regroupés en deux types principaux : équatorial et tropical (Figure 1.1). Certaines régions d'altitude, d'étendue limitée, sont aussi soumises à des climats de montagne, le long du rift Albert (à l'est de la République Démocratique du Congo (RDC)), ou le long de la ligne volcanique du Cameroun. Le climat équatorial à quatre saisons est observé au sud du Cameroun et de la République Centrafricaine RCA, au centre de la RDC, au Congo, au Gabon, en Guinée Equatoriale et à Sao Tomé-et-Principe [11]. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 1 500 à 1800 mm, avec des maxima supérieurs à 10 000 mm par an à Debundsha, au sud-ouest du mont Cameroun, et au sud de l'île de Bioko, en Guinée Equatoriale. Le climat y est chaud et humide avec des températures oscillant entre 22° C et 30° C.

Le climat tropical de l'Afrique centrale qui à deux saisons présente quant à lui plusieurs variantes : soudaniennes, sahéliennes et sahariennes. Les types soudaniens, soudano-sahélien et sahélien couvrent le nord du Cameroun, le sud du Tchad, le centre et le nord de la RCA. Le sud de la RDC bénéficie d'un climat plus tempéré du fait d'une altitude moyenne supérieure aux autres zones. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 300 et 1500mm. Les types sahélo-sahariens

et sahariens comprennent uniquement le nord du Tchad où la pluviométrie annuelle moyenne est inférieure à 300 mm et où les températures maximales peuvent atteindre 50° C [12].

Les climats équatoriaux et tropicaux de l'hémisphère Nord sont caractérisés par une saison sèche principale très sèche et ensoleillée (Décembre à Février) alors que ceux de l'hémisphère Sud, en particulier vers la côte atlantique, bénéficient d'une saison sèche nuageuse préservant des taux d'humidité atmosphérique très élevés (Juin à Août). Ces différences climatiques, de part et d'autre de la charnière climatique séparant les climats de l'hémisphère nord et ceux de l'hémisphère sud, impactent sur la végétation et sont d'une importance encore trop souvent méconnue face aux changements climatiques à venir [13].

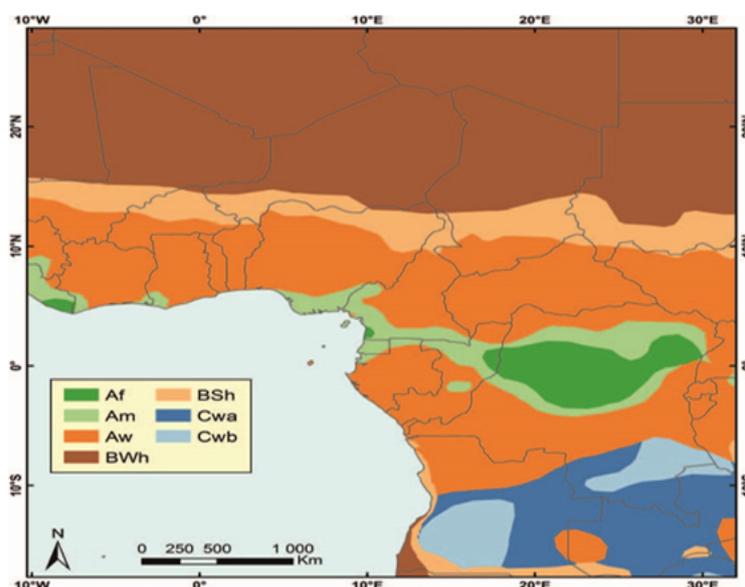


Figure 1.1 – Classification climatique du Bassin du Congo selon le système Köppen-Geiger [14] , où Af = équatorial/humide, Am = tropical/mousson, Aw = tropical/hiver sec, BSh = semi-aride/chaud, BWh = aride/chaud, Cwa = tempéré chaud/hiver sec /été chaud, et Cwb = tempéré chaud/hiver sec/été tempéré.

Remarque : Cette carte est un aperçu très général qui ne reflète que partiellement la variabilité des climats en Afrique centrale. En particulier, le Gabon et le Congo bénéficient climats équatoriaux à subéquatoriaux, intermédiaires entre les climats Af, Am et Aw.

1.2 Dynamique atmosphérique

Deux modes de circulations : la circulation de Hadley et la circulation de Walker contrôlent les déplacements des masses d'air et le climat en Afrique centrale.

La circulation de Hadley

La circulation dite « de Hadley » entre l'équateur et les latitudes tropicales, commande les types de temps et les climats en Afrique centrale.

Les fortes températures présentes sous l'équateur entraînent une importante évapotranspiration et la formation de nuages induisant de fortes précipitations. En s'élevant dans l'atmosphère, l'air devient progressivement plus sec vers les hautes altitudes. Il se déplace alors vers le nord et le sud et, lorsqu'il est suffisamment froid, redescend vers les basses couches de l'atmosphère (Figure 1.2). Les fortes ascendances de vents au niveau de l'équateur font l'effet d'une pompe qui attire alors les vents de surface des latitudes tropicales vers l'équateur. Il atteint sa position la plus méridionale en janvier, dispensant un temps sec correspondant à la saison sèche au nord de l'Afrique centrale.

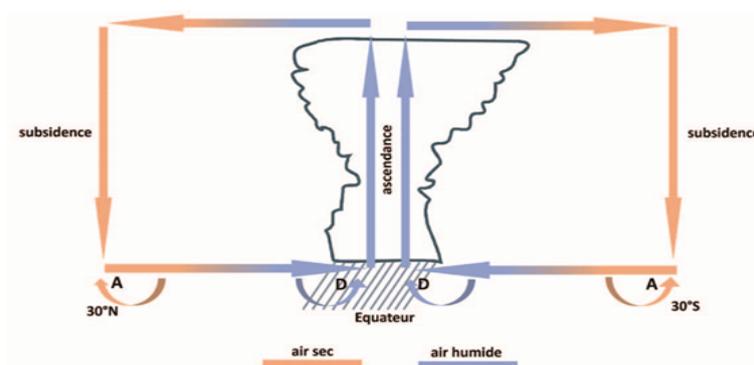


Figure 1.2 – Coupe des cellules de Hadley de part et d'autre de l'équateur [15]

Dans la moyenne troposphérique, la dynamique est dominée par les composantes nord et sud du Jet Est Africain.

La circulation de Walker

L'Afrique centrale subit également l'influence de la circulation cellulaire liant les climats de toute la ceinture tropicale. Cette circulation dite «de Walker » est à l'origine des anomalies saisonnières dans les régions situées à l'est et à l'ouest du Bassin du Congo

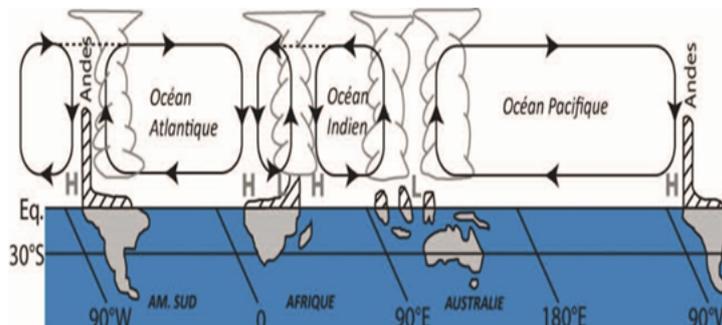


Figure 1.3 – Circulation de Walker [15]

Les circulations de Hadley et de Walker se conjuguent pour moduler les variations saisonnières et annuelles des climats.

1.3 Caractéristiques générales des précipitations en Afrique Centrale

L'Afrique centrale étant située sous les tropiques, la plupart de ses régions reste chaudes. Ainsi, les variations saisonnières de climats sont essentiellement déterminées par les précipitations et l'alternance des saisons pluvieuses et sèches. Les masses d'aires tropicales sont chargées d'humidité à cause de l'évapotranspiration. La disponibilité de grandes quantités d'énergie et d'humidité est une condition préalable pour qu'il y ait des turbulences dans les basses couches de l'atmosphère. D'où, le fait que la région soit généralement favorable à l'instabilité convective, formant en conséquence des nuages à grande extension verticale, provoquant des orages. Les précipitations sont généralement de nature convective données par des systèmes de Mésoscale. Des quantités de précipitations plus élevées sont observées dans les régions équatoriales avec des précipitations atteignant 2000 mm par an en moyenne, dont les zones côtières du Cameroun, ou les quantités de précipitations les plus élevées

du continent africain sont enregistrées (par exemple plus de 11000 mm par an sur les pentes du Mont Cameroun). Cependant des observations météorologique disponibles dans la région sont pour la plus par incomplètes et également incertain.

La répartition saisonnière de la pluviométrie dans le grand bassin du Congo est caractérisée par des régimes de précipitations soient unimodaux, soient bimodaux. Le régime unimodal se limite principalement aux parties nord de la région et montre un maximum à la fin de la saison d'été boréal (Juillet à Aout). Dans les parties nord-ouest, ce régime pluviométrique uni modal est souvent lié à la circulation de la mousson. En plus, les parties dans le sud du bassin du Congo présentent un comportement uni modale des précipitations, en recevant toutefois le maximum de précipitations pendant Décembre-Janvier-Février DJF. La majeure partie de la région est caractérisée par un pluviométrique bimodal avec un plus faible pic de précipitations aux mois Mars-Avril et le pic principal en Octobre-Novembre.

Très peu d'études disponibles décrivent les systèmes synoptiques a moyenne échelle responsable de la génération des pluies dans la région de l'Afrique centrale. Il en est de même pour les processus qui régissent la variabilité interannuelle et inter-décanale des précipitations dans la région. Les études disponibles indiquent que, pour le bassin du Congo, aucun changement clair et régulier de configurations des précipitations au cours des dernières décennies n'a été observé. On a également constaté une variabilité inter-décanale, mais sans changement importants des précipitations à long terme [16]. La même conclusion est contenue dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC [17]. Bien que pour certaines régions une tendance significative en matière de précipitation ait été montrée, celle-ci ne peut, toutefois, être reportée sur l'ensemble du bassin du Congo, simplement en raison de l'absence de données issues des stations d'observation.

1.4 Généralités sur la sècheresse

1.4.1 Définition de la sècheresse

La sècheresse est une caractéristique normale et fréquente du climat. Elle touche l'ensemble des zones climatiques. Mais ses caractéristiques varient significativement d'une région a une autre. La sècheresse n'a pas de définition universelle, il y'a autant de définition de la sècheresse qu'il y'a de définition de l'eau. Mais on peut dire que la sècheresse est un déficit des disponibilités en eau par

rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée. Il est important de noter qu'on distingue généralement trois types de sécheresses à savoir : la sécheresse météorologique, la sécheresse agricole et la sécheresse hydrologique. Cette distinction porte essentiellement sur la répartition temporelle du déficit pluviométrique.

1.4.2 La sécheresse agricole

En agriculture, la sécheresse est définie comme un déficit marqué et permanent de la pluie qui affecte les productions agricoles estimées d'après des valeurs moyennes ou attendues.

1.4.3 La sécheresse météorologiques

D'un point de vue météorologique, la sécheresse est une absence prolongée, un déficit significatif, voire une faible distribution, des précipitations, en relation avec une valeur dite normale.

1.4.4 La sécheresse hydrologique

On parle de sécheresse hydrologique pour un déficit d'écoulement dans les cours d'eau. Elle se définit par l'écart de l'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine par rapport à une normale sur une période donnée. Elle est ainsi liée aux conséquences d'un déficit pluviométrique sur le système hydrologique, mais ce lien n'est pas forcément direct. En effet, le niveau d'eau dans les fleuves et les lacs ainsi que dans les aquifères n'est pas en relation linéaire avec le niveau de précipitation, du fait d'abord des multiples usages des ressources en eau qui peuvent entraîner eux aussi d'importants déficits et sont souvent en compétition (irrigation, tourisme, production électrique ...).

1.5 Rappel sur le cycle de l'eau

Si nous focalisons maintenant notre attention sur la phase de précipitation du cycle de l'eau comme indiqué figure 1.4, nous retrouvons des grandeurs qui intéressent l'hydrologie, et en particulier la quantité d'eau qui s'infiltré vers les nappes par drainage et ruisselle vers les cours d'eau par l'écoulement superficiel. Il est intéressant de noter que cette vision conduit à la notion de "pluie efficace" pour

les hydrologues (pluie moins évapotranspiration), qui est radicalement différente de celle de “pluie efficace” pour un agronome considérant le bilan hydrique (pluie parvenant au sol pour alimenter le réservoir, donc pluie moins interception par le feuillage et moins ruissellement). L’eau ainsi écoulee alimente les ressources en eau, dites renouvelables. Elle se répartit, en fonction de la perméabilité du sol, en trois flux secondaires : le ruissellement, qui alimente les rivières et les fleuves, le drainage par infiltration superficielle qui recharge les nappes aquifères, et le drainage souterrain profond qui fournit les nappes les plus profondes.

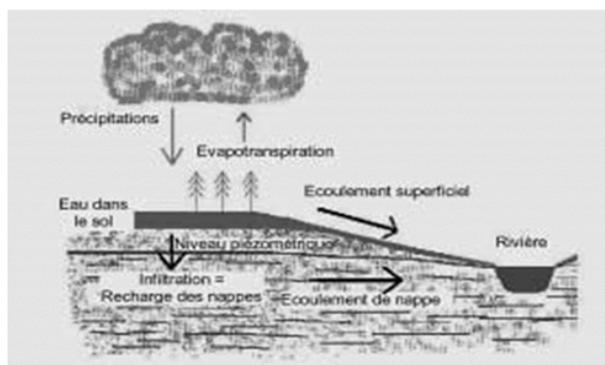


Figure 1.4 – Schématisation du cycle de l’eau (Bulletin hydrologique du RNDE, disponible sur le site du MEDD www.ecologie.gouv.fr, d’après www.oieau.fr et www.inra.fr/Intranet/Projets/émergence/eau/fiche-eau.htm).

1.6 Description du climat actuel et variation des régimes hydrologiques

Un changement climatique brutal est survenu en Afrique il y a plusieurs décennies avec des impacts variés sur les régimes hydrologiques [18] [19]. Ces variations de régime hydrologique sont liées à la fois aux changements climatiques et aux activités humaines. L’Afrique centrale semble beaucoup moins impactée par les activités humaines que d’autres régions africaines, ceci étant dû à une densité de population et un développement agricole plus faibles.

En Afrique centrale, les hydrologues ont étudié les régimes hydrologiques de nombreux cours d’eau pendant des décennies depuis les années 1950.

Les données sont rassemblées dans le système d’information SIEREM ([20], ; <http://www.hydros->

ciences.org/sierem/) et dans l'observatoire HYBAM du bassin versant du fleuve Congo (<http://www.orehybam.org>). Ces données sont utilisées pour étudier la variabilité du régime des fleuves en conjonction avec les changements de pluviométrie.

Tendances globales des régimes hydrologiques des grands bassins versants en Afrique centrale

Les valeurs standards des débits annuels observés sur de longues périodes pour plusieurs bassins versants de grands cours d'eau d'Afrique centrale et occidentale ont été étudiées sur de vastes régions [19]. Elles indiquent des différences dans la variabilité interannuelle des débits selon les régions. Des périodes communes de hauts débits et de bas débits ont pu être observées (au cours des années 1910, 40, 60, 70) [19]. Mais certaines périodes révèlent des différences dans l'évolution de ces débits (années 50 et 80) [19]. Les cours d'eau équatoriaux ne révèlent aucune tendance interannuelle alors que les cours d'eau tropicaux accusent une diminution des débits depuis les années 70 ; au contraire, le débit des cours d'eau sahéliens a augmenté depuis les années 80 [19].

1.7 Quelques problèmes relatifs au suivi du climat en Afrique centrale

1.7.1 L'observation du climat en Afrique centrale

En 2000, le Système d'Observation du Climat mondial (GCOS), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et les services nationaux hydrologiques et météorologiques ont réalisé plusieurs évaluations des systèmes d'observation du climat dans différentes parties du monde. Le résultat de cette évaluation a montré que la densité et la qualité des stations météorologiques en Afrique sont les plus faibles de la planète. De 2001 à 2005, des consultations régionales ont alors été entreprises pour développer des plans d'action régionaux pour l'Afrique. En particulier, le plan d'action UANEPAD pour l'environnement et la stratégie régionale de réduction des risques ont souligné le besoin d'améliorer la disponibilité et l'usage des données climatiques comme un moyen de favoriser le développement économique de l'Afrique. Mais, jusqu'à présent, aucune réalisation concrète n'a permis d'améliorer cette situation.

[21] mentionnent qu'il existe actuellement 419 stations météorologiques et 230 stations hydrologiques pour l'ensemble des dix pays de la COMIFAC. Certaines de ces stations fournissent des

données depuis plus d'un siècle. Les premières mesures climatiques régulières ont débuté en 1885 et 1889 dans les stations de Douala et de Yaoundé, au Cameroun [22]. Selon ces auteurs, la majorité de ces stations n'ont toutefois entamé des observations que dans les années 1950 et 1960. Depuis les années 1980, plusieurs stations ont malheureusement cessé de fonctionner régulièrement et les séries temporelles sont souvent discontinues, limitant le nombre de stations disposant de séries de données complètes et fiables.

Afin de compenser le manque de données climatiques observées sur le terrain, l'utilisation d'estimations dérivées de données issues de satellites géostationnaires s'est largement répandue. Des études récentes basées sur l'usage de divers satellites ont permis de tester des méthodes de calibration [23], [10]. Ces études ont eu tendance à adopter des variables de remplacement, (ou proxys) en lieu et place des variables climatiques, telles que les débits des rivières pour représenter les quantités de pluies ou l'altimétrie satellite pour évaluer les ressources en eau et le climat.

1.7.2 Stratégies élaborées par les pays et institutions régionales pour améliorer la disponibilité des données climatiques.

Le programme Climat pour le développement (ClimDev-Afrique)

ClimDev-Afrique est une initiative conjointe entre la Banque africaine de développement (BAD), l'Union africaine et la Communauté économique africaine (BAD, 2009). Elle vise à améliorer l'implication des fournisseurs de données climatiques, en particulier les services météorologiques et hydrologiques et les organisations de recherche, dans des projets de développement de manière à créer des liens directs entre les services procurés par le climat et les priorités de développement. ClimDev permettra un flux continu de données climatiques entre les fournisseurs et les utilisateurs de données. La BAD a été mandatée pour accueillir et gérer un fond spécial pour le programme, appelé le Fond spécial africain ClimDev (FSCD).

Réseau de télécommunication météorologique régional en Afrique centrale

Les pays d'Afrique centrale sont membres du Réseau de télécommunication météorologique régional (RTMR) et de l'ASECNA (l'Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar). L'ASECNA coordonne le réseau de télécommunication satellitaire SATCOM, qui

couvre l'Afrique occidentale et centrale y compris Madagascar, et qui supporte les communications des programmes d'aviation civile. Le réseau SATCOM dispose d'assez de capacité pour assurer également les liaisons GTS améliorées (Système mondial de télécommunication de l'OMM), qui sont mises en œuvre par les membres de l'ASECNA. Le réseau SATCOM offre une opportunité unique de moderniser le RTMR d'Afrique occidentale et centrale. Des discussions entre les pays membres sont conduites sur les modalités opérationnelles qui permettraient au réseau SATCOM d'améliorer le RTMR dans les pays de l'ASECNA.

Conclusion

L'objectifs de ce chapitre était de présenter de manière générale le climat en Afrique centrale. De décrire les précipitations et les régimes hydrologique des bassins versants.

DOMAINE D'ÉTUDE , DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

Introduction

La démarche adoptée dans ce chapitre est la suivante : tout d'abord nous allons présenter la zone d'étude (localisation et topographie), ensuite nous allons faire une présentation brève des données utilisées, et enfin nous présenterons la méthodologie utilisée dans notre travail.

2.1 Description et localisation de la zone d'étude

Notre zone d'étude est l'Afrique centrale qui est constitué des pays qui sont : le Cameroun ; le Congo ; la République Démocratique du Congo ; le Gabon ; la République Centrafricaine, l'Angola. La région présente une topographie complexe et se caractérise par des régimes pluviométriques différents. Les facteurs locaux tels que l'hétérogénéité du terrain et la surface terrestre, leurs interactions consécutives avec les mécanismes de forçages climatique à grande échelle, contribuent aux diverses précipitations spatiales dans la région. Cette étude se concentre sur la région AEC (10° S – 10° N, 10° E – 32° E ; encadré dans la figure 2.1) couvrant le bassin du Congo et ses environs. Cette partie de l'Afrique Centrale est la troisième région au monde ayant de profond convection et de chauffage troposphérique associé à la convection qui est un facteur du tropical circulation générale [24]

2.2 Données utilisées

L'un des principaux problèmes dans l'étude du climat en Afrique Centrale est le manque de base de données d'observation de haute qualité a une résolution spatiale et temporelle appropriée [25]. Au cours des dernières décennies, les mesures satellitaires ont en partie amélioré la situation. Les données de précipitations utilisées dans cette étude, proviennent des observations par satellite sur la période

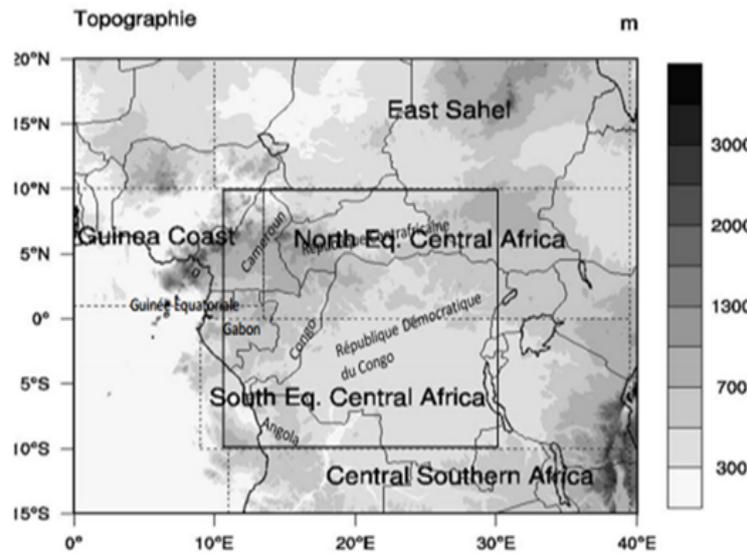


Figure 2.1 – Localisation de la zone d'étude

de 1998 à 2013.

2.2.1 Tropical Rainfall Measuring Mission

Le Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) est un satellite entièrement destiné à la mesure des précipitations. Il a permis d'obtenir des séries données sur les précipitations tropicales et sur les cycles interannuels diurne. Il a fourni des informations nouvelles et fondamentale sur les systèmes climatiques tropicaux et sub-tropicaux. Dans le domaine de la recherche appliquée la Mission de mesure des précipitations tropical a notamment fourni de nombreuses informations sur les processus physiques à l'œuvre à une échelle fine sur la formation des précipitations tropicales. Les précipitation journalières TRMM utilisées dans cette étude couvrent la période 1998 -2013, à la résolution spatiale $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ [26].

2.2.2 Global Precipitation Climatologie Project

Les Global Precipitation Climatologie Project (GPCP) a produit des données de précipitations [27] relevées à partir des satellites géostationnaires de la NASA. Les précipitations journalières GPCP utilisées dans cette étude couvre la période 1998-2013 avec une résolution spatiale de 10×10 . Ces deux jeux de données sont très utilisés pour des études aussi bien en climatologie qu'en hydrologie

[28].

2.2.3 Matériel utilisé

Le logiciel utilisé ici est NCL (NCAR Command Language). C'est un produit du laboratoire informatique et systèmes informatiques du centre national de recherche atmosphérique (NCAR) Aux Etats Unis d'Amérique L'utilité de la langue NCL est évidente dans trois composantes principales :

- entrée et sortie de fichier ;
- l'analyse des données ;
- la visualisation.

NCL possède de nombreuses fonctionnalités communes aux langages de programmation modernes, notamment les types, les variables, les opérateurs, les expressions, les instructions, les boucles et les fonctions et procédures. NCL est utilisé dans le cadre de notre étude pour lire les données qui sont ici sous forme de fichier netCDF, écrire les programmes pour ressortir les figures

2.3 Méthodologie

Les méthodes utilisées sur cet article sont basées sur le calcul d'indices climatiques avec les séries de pluies journaliers.

2.3.1 Indice Normalisé des précipitations (INP)

L'analogie pluviométrique encore appelé variabilité interannuelle est un outil qui permet de mesurer l'écart entre une intensité de précipitation et la moyenne qui représente généralement les valeurs normales de précipitation. Elle permet de voir comment au cours d'une année, les précipitations s'éloignent de la normale. Afin de voir l'évolution des anomalies pluviométriques, nous calculons les indices normalisés des précipitations sur les moyennes annuelles des hauteurs de pluies. Mathématiquement, il est traduit par la formule suivante :

$$l_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)} \quad (2.1)$$

x_i : Valeurs de la pluviométrie annuelle ; \bar{x} : Valeur moyenne de la pluviométrie annuelle de la période d'étude ; $\sigma(x)$ Écart-type de la pluviométrie de la période d'étude

Cet indice permet également de mesurer la sévérité de la sécheresse dans différentes classe [29] et est classe de tel sorte que les valeurs négatives représentent la sécheresse (état de l'atmosphère sec) et les valeurs positives les périodes humides (état de l'atmosphère seiche en vapeur d'eau). Ces différentes classes ainsi que les qualifications associées sont présentées dans tableau (2.1)

Cette classification montre trois types d'humidité : humidité modérée ($0 < INP < 1$), humidité forte ($1 < INP < 2$), humidité forte ($INP > 2$).

Ce tableau montre également 3 types de sécheresse : sécheresse modérée ($-1 < INP < 0$), sécheresse forte ($-1 < INP < -1$), sècheresse extrême ($INP < -2$)

Tableau 2.1 – Classification des séquences de sécheresse selon l'indice normalisé des précipitations (INP)

Classe des INP	Qualification
$INP > 2$	humidité extrême
$1 < INP < 2$	humidité forte
$0 < INP < 1$	humidité modérée
$-1 < INP < 0$	sècheresse modérée
$-2 < INP < -1$	sècheresse forte
$INP < -2$	sècheresse extrême

2.3.2 Palmer Drought Severity Index (PDSI)

Origine : Palmer Drought Severity Index encore appelé Indice de sévérité de sécheresse Palmer (PDSI) a été créé par Wayne C. Palmer (1965) dans le but de mesurer le départ cumulatif (par rapport aux conditions moyennes locales) de l'offre et de la demande d'humidité atmosphérique à la surface.

Caractéristiques : Il intègre les précipitations antécédentes, l'alimentation en eau et la demande en eau [30] dans un système de comptabilité hydrologique. Comptabilise toutes les constantes contenues dans PDSI et inclut une méthodologie dans lequel les constantes sont calculées dynamiquement en fonction des caractéristiques présentes à chaque emplacement de la gare. Les zones très sèches de la planète, sont définies par $PDSI < -3.0$ et celles très humides sont définies par $PDSI > +3$.

Paramètres d'entrée : Température et précipitations mensuelles. Information sur la retenue d'eau la capacité des sols peut être utilisée, mais des valeurs par défaut sont également disponibles. Un dossier complet en série de les données de température et de précipitations sont nécessaires.

Applications : Peut être appliqué aux sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques des situations. Les résultats étant directement liés à l'emplacement de la station, les événements extrêmes sont rares, sont directement liées aux informations de cette station et non à une constante.

2.3.3 Bref aperçu de la procédure Palmer

L'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) a été l'une des premières procédures à démontrer l'efficacité de la quantification de la gravité des sécheresses sous différents climats. Son objectif était de développer une méthodologie générale d'évaluation (de la sécheresse) en termes d'indice permettant de comparer dans le temps et dans l'espace la gravité de la sécheresse (Palmer, 1965).

Ce paragraphe décrit en détail comment calculer le PDSI sur un pas de temps d'un mois. Chaque mois de chaque année, quatre valeurs liées à l'humidité du sol sont calculées, ainsi que leurs valeurs potentielles complémentaires. Ces huit valeurs sont l'évapotranspiration (ET), la recharge (R), le ruissellement (RO), la perte (L), l'évapotranspiration potentielle (PE), la recharge potentielle (PR), le ruissellement potentiel (PRO) et la perte potentielle (PL). L'évapotranspiration potentielle est calculée à l'aide de la méthode de Thornthwaites décrite par Rosenberg [31]. Le calcul de ces valeurs dépend fortement de la capacité de rétention d'eau disponible du sol repose sur une modélisation du sol en deux étapes. On suppose que la couche supérieure du sol est capable de contenir un pouce d'humidité. La quantité d'humidité pouvant être retenue par le reste du sol sous-jacent est une valeur d'entrée, caractéristique de cet endroit, qui doit être introduite dans le programme. Les quatre valeurs potentielles sont pondérées en fonction du climat de la région à l'aide de α , β , γ et δ pour donner les valeurs potentielles CAFEC (conditions appropriées du point de vue climatique pour les conditions existantes)). Les facteurs de pondération α , β , γ et δ sont appelés coefficients de bilan hydrique et se présentent de la manière suivante :

$$\alpha_i = \frac{\overline{ET}_i}{\overline{PE}_i}; \quad \beta_i = \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i}; \quad \gamma_i = \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i}; \quad \delta_i = \frac{\overline{L}_i}{\overline{PL}_i} \quad (2.2)$$

Où i varie au cours des mois de l'année. La barre sur un terme indique une valeur moyenne. Par

exemple, la perte moyenne est calculée pour janvier

$$\bar{L}_i = \frac{\Sigma L_1}{\#ofyearsofdata} \quad (2.3)$$

Les valeurs de potentiel CAFEC sont combinées pour former la précipitation CAFEC, qui représente la quantité de précipitations nécessaire pour maintenir un niveau d'humidité du sol normal pendant un mois.

$$\hat{P} = \alpha_i PE + \beta_i PR + \gamma_i PRO - \delta_i PL \quad (2.4)$$

La différence entre les précipitations réelles tombées au cours d'un mois donné et les précipitations calculées selon la méthode CAFEC est le point de départ de l'humidité, noté d.

$$d = P - \hat{P} = P - (\alpha_i PE + \beta_i PR + \gamma_i PRO - \delta_i PL) \quad (2.5)$$

Le départ d'humidité, d, est l'excès ou le manque de précipitations par rapport aux précipitations CAFEC. Bien sûr, le même d signifie différentes choses à différents moments et à différents endroits. Cela empêche des comparaisons directes entre différentes valeurs de d. Pour corriger cela, le départ d'humidité est pondéré à l'aide de K, appelée caractéristique climatique. K est en fait un raffinement de K' qui est l'approximation générale de Palmers pour le climat caractéristique d'un lieu. Palmer a dérivé les formules suivantes pour K' et pour K.

$$K'_i = 1.5 \times \log_{10} \left(\frac{\frac{\overline{PE_i + R_i + RO_i}}{\overline{L_i + P_i}} + 2.8}{D_i} \right) + 0.5 \quad (2.6)$$

$$K_i = \frac{17.67}{\Sigma_{1 \leq k \leq 12} \overline{D_j} K'_j} K'_i \quad (2.7)$$

La valeur de 17,67 est une constante empirique obtenue par Palmer à partir de données provenant de neuf localisations différentes. La caractéristique climatique K a pour but d'ajuster la valeur de d en fonction des caractéristiques du climat de manière à permettre des comparaisons précises dans le temps et dans l'espace. Le résultat de la multiplication du départ d'humidité, d, par K est appelé indice d'anomalie d'humidité, ou indice Z, et est noté Z.

$$Z = dK \quad (2.8)$$

L'indice Z peut être utilisé pour indiquer son degré d'humidité ou de sécheresse pendant un mois, sans tenir compte des tendances historiques actuelles du climat. L'indice Z est utilisé pour calculer la

valeur PDSI pour un mois donné en utilisant la formule générale ci-dessous.

$$X_i = 0.897X_{i-1} + \frac{1}{3}Z_i \quad (2.9)$$

Par exemple, pour calculer la valeur actuelle de X_i , on ajoute 0,897 fois la valeur PDSI précédente X_{i-1} à un tiers de l'anomalie d'humidité actuelle Z_i . Palmer a appelé les valeurs 0,897 et $\frac{1}{3}$ les facteurs de durée. Ils ont été dérivés empiriquement par Palmer de deux endroits (ouest du Kansas et centre de l'Iowa) et ont une incidence sur la sensibilité de l'indice aux événements de précipitations.

Trois valeurs PDSI sont en fait calculées chaque mois : X_1 , X_2 et X_3 . Les valeurs de X_1 et X_2 correspondent respectivement à la gravité d'une période sèche ou mouillée susceptible de s'établir. Un sort est établi lorsqu'il atteint le seuil de $\pm 0,5$. Ce seuil découle du fait que les valeurs d'indice comprises entre -0,5 et 0,5 sont considérées comme des valeurs normales. X_3 est la gravité d'une période sèche ou humide actuellement établie. S'il n'y a pas de sort établi, la valeur PDSI est définie sur X_1 ou X_2 , en fonction du sort le plus susceptible de s'établir, ou en d'autres termes, se produit réellement. Ceci est déterminé par l'index qui est le plus proche du seuil d'un sort établi, qui est simplement l'indice avec une valeur absolue plus grande. S'il existe un sort en cours, c'est-à-dire lorsque X_3 n'est pas égal à zéro, la valeur PDSI de ce mois est X_3 . Cependant, il peut être découvert que le sort actuel s'est effectivement terminé plus tôt, lorsque l'indice est calculé à une date ultérieure. Dans ce cas, les valeurs PDSI seront remplacées par les valeurs de X_1 ou X_2 . Ce remplacement des valeurs PDSI calculées précédemment sera appelé retour arrière. Le fonctionnement exact du retour en arrière et les facteurs qui l'entraînent sortent du cadre de notre travail. Cependant, l'existence de retours en arrière signifie qu'un léger changement dans la manière dont les indices sont calculés peut provoquer des retours en arrière, ce qui a un effet substantiel sur les valeurs finales de l'indice.

2.3.4 Une méthode pour calibrer le PDSI

Il est important de noter que l'indice de palmer utiliser dans ce travail a été étalonnée. Le PDSI à auto-étalonnage remplace les caractéristiques climatiques et les facteurs de durée dérivés empiriquement par des valeurs calculées automatiquement à partir des données climatiques historiques d'un lieu donné. Le PDSI à auto-étalonnage établit des facteurs de durée distincts pour les périodes sèches et humides. Les facteurs de durée d'indice sont calculés à l'aide de la méthode des moindres carrés pour les conditions extrêmement humides et extrêmement sèches ce qui donnera deux ensembles de

paramètres m et b tels que

$$\sum_{i=1 \leq k \leq t} Z_i = mt + b \quad (2.10)$$

Deux instances d'équation sont créées : X_1 pour les périodes sèches et X_2 pour les périodes humides. Théoriquement, le PDSI pourrait être calibrer pour n'importe quelle catégorie de sécheresse et/ou de période humide. Cependant, le plus facile à défendre consiste à calibrer des périodes extrêmes de précipitations humides et sèches :

✓ Palmer a calibré son indice sur des périodes sèches

✓ Il utilise une fréquence de 1 à 3 pourcent pour des conditions extrêmes de conditions humides et sèches est définie dans la littérature, alors qu'il n'y pas de fréquences d'événements communément acceptée pour les autres catégories de Palmers humide et sec.

Procédure d'étalonnage du PDSI

Le processus de remplacement de toutes les constantes empiriques dans la procédure de calcul du PDSI de Palmers a abouti à un processus légèrement plus compliqué qu'auparavant. Il est intéressant de passer en revue la procédure mise à jour étape par étape.

- 1- Calculez tous les départs d'humidité.
- 2- Calculer toutes les anomalies d'humidité en utilisant l'équation (4).
- 3- Calculez les facteurs de durée décrits à l'aide des anomalies d'humidité calculées à l'étape 2.
- 4- Calculez le PDSI en utilisant les anomalies d'humidité et les facteurs de durée calculés aux étapes 2 et 3 respectivement.
- 5- Recherchez les valeurs maximales et minimales du PDSI.
- 6- Calculez les nouvelles anomalies d'humidité.
- 7- Calculez le PDSI auto-calibré.

Conclusion

Le PDSI peut être calculé sur différentes durées. L'objectif de ce chapitre était de présenter la zone d'étude, les données utilisées et décrire les différentes techniques d'analyse. Le travail qu'il reste à effectuer pour le prochain chapitre est celui de présenter, d'analyser et d'interpréter les résultats

obtenus à partir des données et des techniques utilisées dans ce chapitre.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

L'application des méthodes présentées au chapitre précédent sur les données de précipitation journalières des deux jeux de données nous ont donné les résultats qui sont présentés dans ce chapitre. La première partie sera l'interprétation de la distribution spatiale et la variabilité interannuelle des précipitations. Nous enchaînerons avec l'interprétation de la distribution spatiale et la variabilité interannuelle de l'indice normalisé des précipitations. Enfin nous effectuerons une analyse sur la distribution spatiale et la variabilité interannuelle l'indice PDSI.

3.1 Analyse des deux jeux de données

3.1.1 Cycle annuel des précipitations

Le cycle annuel est une représentation graphique nous permettant de visualiser les différentes saisons au cours d'une année. Nous observons sur la figure 3.1 un cycle annuel bimodale caractérisé par une variabilité considérable des précipitations. Sur la figure A) Nous observons deux maximas de pluies pendant : la saison MAM, et la saison SON . Nous avons aussi un minimum de pluies observées pendant la saison MJJ. Nous observons des baisses de précipitations pendant les périodes : d'Avril à Juin (4.40mm/jour à 2.80mm/jour) et d'Octobre à décembre (5.50mm/jour à 3.60mm/jour). Nous notons aussi des périodes d'augmentation des pluies de Janvier à Avril (3.05mm/jour à 4.40mm/jour) et de Juin à Octobre (2.80mm/jour à 5.50mm/jour).

Pour la figure 3.1 B) nous faisons les mêmes observations que celles faites sur la figure 3.1 A) avec de légère différence au niveau des hauteurs de précipitations comme par exemple les périodes de baisses et de hausses de Précipitations sont les mêmes. Le maximum de précipitations observé pendant

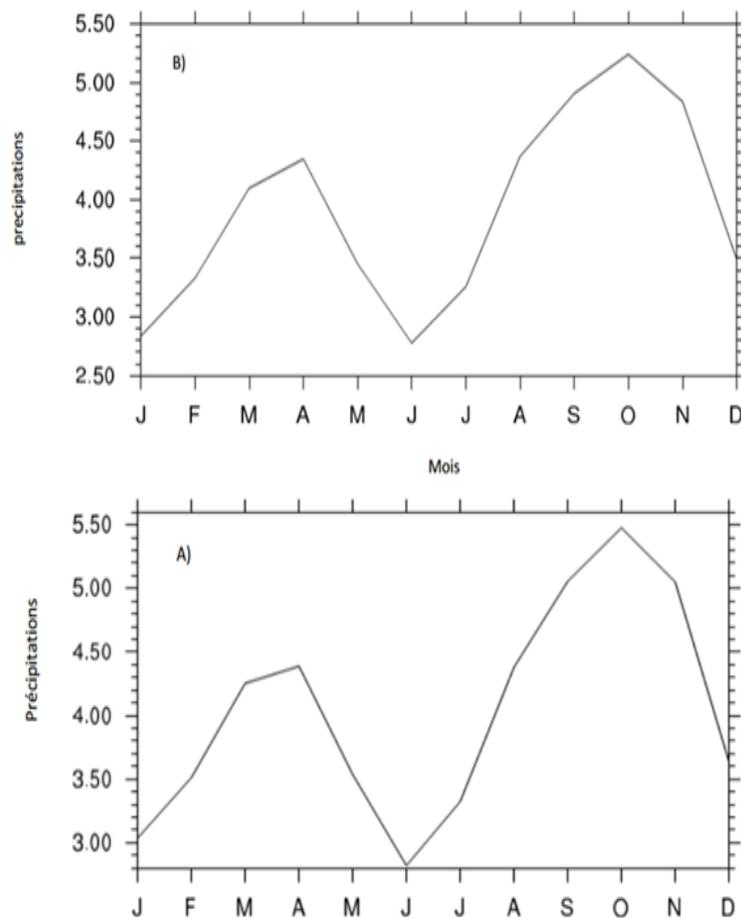


Figure 3.1 – Cycle annuel des précipitations en mm /jour : pour A) la période de (1998-2013) du GPCP et pour en B) la période de (1998-2013) du TRMM.

la saison SON qui est légèrement différent de celui observé sur la figure 3.1 A). Les similitudes observées sur la figure noter 3.1 A) et 3.1 B) est due à la concordance des données TRMM et GPCP. La baisse de pluies observée durant la saison AMJ sera étudiée dans la suite de notre travail. Ceci passera d'abord par une étude de la distribution spatiale de nos deux jeux de données de précipitations.

3.1.2 Variabilité spatiale des précipitations

La distribution spatiale est une méthode permettant d'évaluer les signes des changements climatiques pour une période donnée. Elle est indiquée pour les régions présentant une diversité géomorphologique [32] telle que l'Afrique centrale. L'approche consiste ici à utiliser plusieurs bases de données et à trouver un accord entre elles. La figure 3.2 montre la climatologie des précipitations

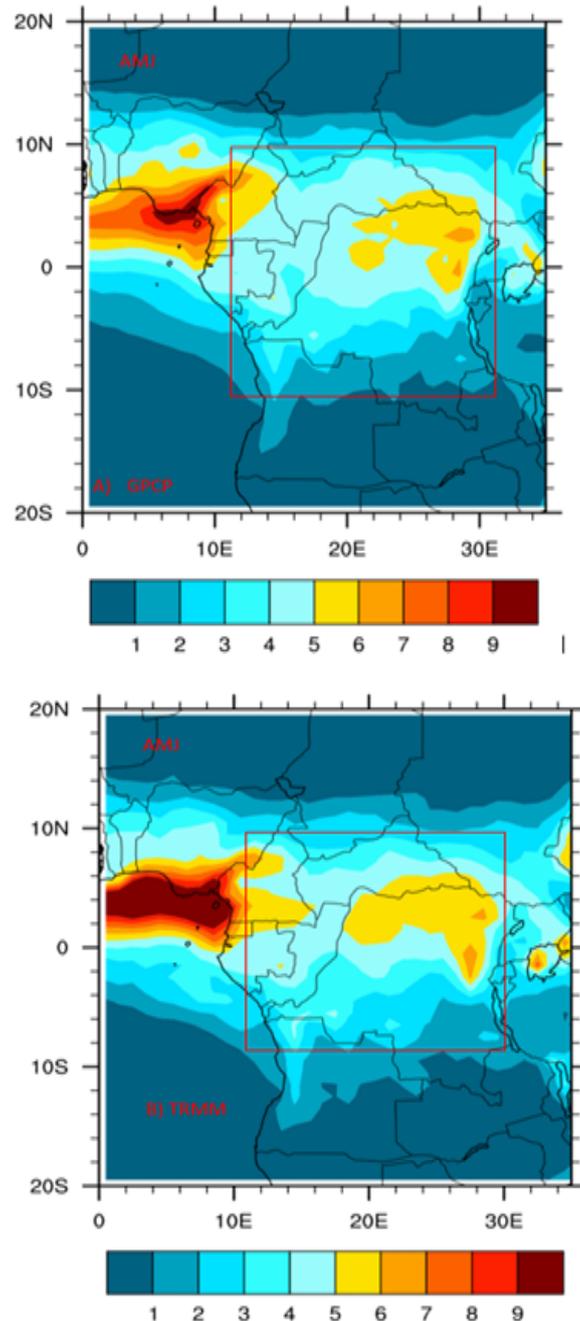


Figure 3.2 – Distribution spatiale de précipitation moyenne temporelle d’AMJ en mm/jour : pour A) GPCP (1998-2013) et pour B) TRMM (1998-2013). La zone carrée indique la région d’étude.

moyenne sur le temps pendant la saison AMJ des données TRMM et GPCP. Pour la figure 3.2A) GPCP nous observons une zone marquée par des précipitations à hauteur de 9mm/jour. Cette forte précipitation est fortement influencée par la proximité avec l’océan atlantique, par conséquent soumise à l’influence de la mousson africaine pendant la saison AMJ. Les précipitations journalières

varient de 7mm/jour à 2mm/jour dans notre zone d'étude (zone encadré sur la figure 3.2). Les régions de précipitations les plus importantes sont observées sur : la côte guinéenne due à l'influence de la mousson africaine favorisée par l'océan atlantique, l'ouest du Cameroun influencé par la topographie tel que le Mont Cameroun et les petites montagnes qui bordent cette côte atlantique, le Sud Congo due à sa proximité avec le bassin du Congo. Dans les autres parties de l'Afrique centrale les observations faites nous montrent que le Nord de l'Afrique centrale présente des précipitations très basse (inférieure à 4mm/jour). Cette région est influencée par un climat tropical, soudanien et sahélien qui couvre le Nord Cameroun, le sud du Tchad, le centre et sud de la RCA. Le sud de RDC bénéficie d'un climat plus tempéré du fait d'une altitude moyenne supérieure aux autres zones.

Les observations faites sur la Figure 3.2 B avec TRMM sont pratiquement identiques à celle faite sur la figure 3.2A) obtenues avec la donnée GPCP à quelques différences près. Par exemple la zone marquée par des pluies de 9mm/jour est plus large que celle observée sur Figure 3.2A) GPCP. Nous observons trois petites zones marquées par des précipitations à hauteur de 6 et 7mm/jour à l'Est de l'Afrique centrale. Malgré cette différence de couverture spatiale, les données GPCP et TRMM sont pour la plupart similaires et donc fournies des informations cohérentes sur l'ensemble de la région d'étude et permettant ainsi une analyse de la variabilité interannuelle des précipitations.

3.1.3 Variabilité interannuelle des précipitations

La variabilité climatique se définit comme étant la variation de l'état moyen du climat à des échelles temporelles et spatiales. Il sera question pour nous d'étudier l'évolution moyenne des précipitations pendant la saison AMJ durant les années allant de 1998-2013.

La figure 3.3 présente la variabilité interannuelle de la moyenne saisonnière AMJ des précipitations en Afrique centrale pour les données GPCP. On observe sur cette figure une forte variabilité de pluies avec des pics en 2001 (4mm/jour) et en 2007 (4.19mm/jour). Nous avons également une forte décroissance des précipitations après l'année 2007. Une tendance générale à la baisse des précipitations sur toute la période d'étude est observée avec un coefficient de régression -0,021875. . La figure 3.4 présente la variabilité interannuelle de la moyenne saisonnière AMJ des précipitations en Afrique centrale pour les données TRMM. Nous observons sur cette figure une forte variabilité de pluies avec des pics en 2001 (4mm/jour) et en 2007 (4.20mm/jour). Nous observons également une forte décroissance des précipitations après l'année 2007. La tendance générale à la baisse des

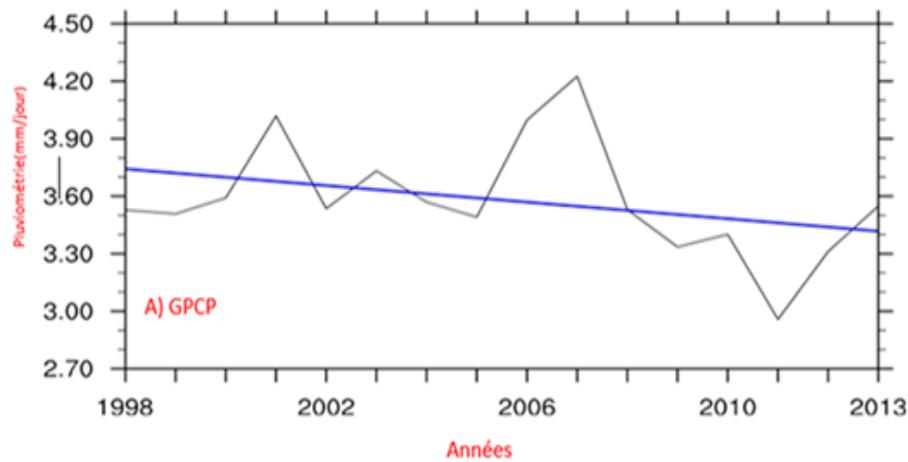


Figure 3.3 – Variabilité interannuelle des précipitations moyennes pendant la saison AMJ des données GPCP (1998-2013).

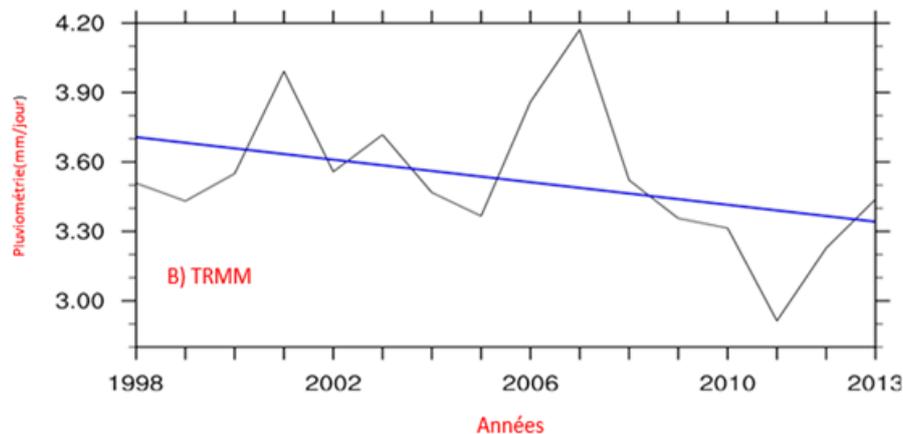


Figure 3.4 – variabilité interannuelle des précipitations moyennes pendant la saison AMJ des données TRMM (1998-2013)

précipitations est clairement mise en évidence par une droite de régression avec un coefficient de régression de $-0,0225$.

En conclusion, le cumul de précipitations moyennes pendant la saison AMJ durant les années 1998-2013 a une tendance générale à la baisse. Cette tendance est beaucoup plus prononcée à partir de l'année 2006. Il sera question pour nous d'analyser cette baisse de précipitations à travers l'analyse des représentations de la variabilité interannuelle de l'indice standardisé des précipitations.

3.2 Analyse de l'indice normalisé des précipitations (INP)

L'indice INP est fondé sur la probabilité de précipitations sur une période. La précipitation est le seul paramètre nécessaire pour le calcul de INP. Il est possible de calculer l'indice pour diverses échelles de temps, celui-ci permettant de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité. Puisque notre objectif est de caractériser une possible sécheresse hydrologique suite à la baisse de pluie observée plus haut, nous calculerons le INP sur une période de 6 mois. La caractérisation du déficit de pluie se fera à travers des distributions spatiale et variabilité interannuelle des indices standardisés des précipitations.

Variabilité interannuelle de l'indice normalisé des précipitations

Nous avons appliqué le calcul du INP aux précipitations journalières de nos jeux de données GPCP et TRMM sur la période de 1998-2013, et nous avons obtenu les courbes des anomalies pluviométriques de la figure 3.5. La détections des périodes sèche ou humides est analysée avec la méthode des anomalies pluviométriques et le tableau de classification des INP. La figure 3.5 montre la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique centrale (10°N - 10°S et 10°E - 32°), calculés sous forme d'anomalies et écart type pour la période 1998-2013 pendant la saison AMJ. L'analyse de la figure 3.5a nous montre que sur la période de 1998-2013 le nombre d'années sèches (8) est quasiment égale au nombre d'années humides (7). Les anomalies pluviométriques montrent une prédominance des années humides sur les périodes allant de (2001 à 2003); (2006 à 2008) et celles des années sèches qui vont de (1998 à 2000); (2009 à 2013). Parmi les années humides seule l'année 2006 est marquée par une humidité forte ($1 < \text{INP} < 2$) et les autres années (2001,2002,2003,2007,2008) sont des années d'humidité modérée ($0 < \text{INP} < 1$). On remarque également que seul l'année 2012 est marquée par une sécheresse forte. Les autres années sèches (1998,1999,2000,2004,2005,2009,2011,2012) sont des années modérées. Nous observons une baisse de INP à partir de l'année 2006.

Les anomalies pluviométriques calculées à partir des précipitations journalières des données TRMM (voir Figure 3.5 b) nous montre une représentation périodique du INP qui varie de -0.8 à 0.8. Le nombre d'années sèches (09) est supérieure au nombre d'années humides (06). Les périodes humides vont de 2001 à 2003, et de 2006 à 2008. Les années sèches vont de (1998-2000), (2004-2005), (2009-2013). Les périodes sèches sont caractérisées par des sécheresse modérées ($-1 < \text{INP} < 0$) et celles

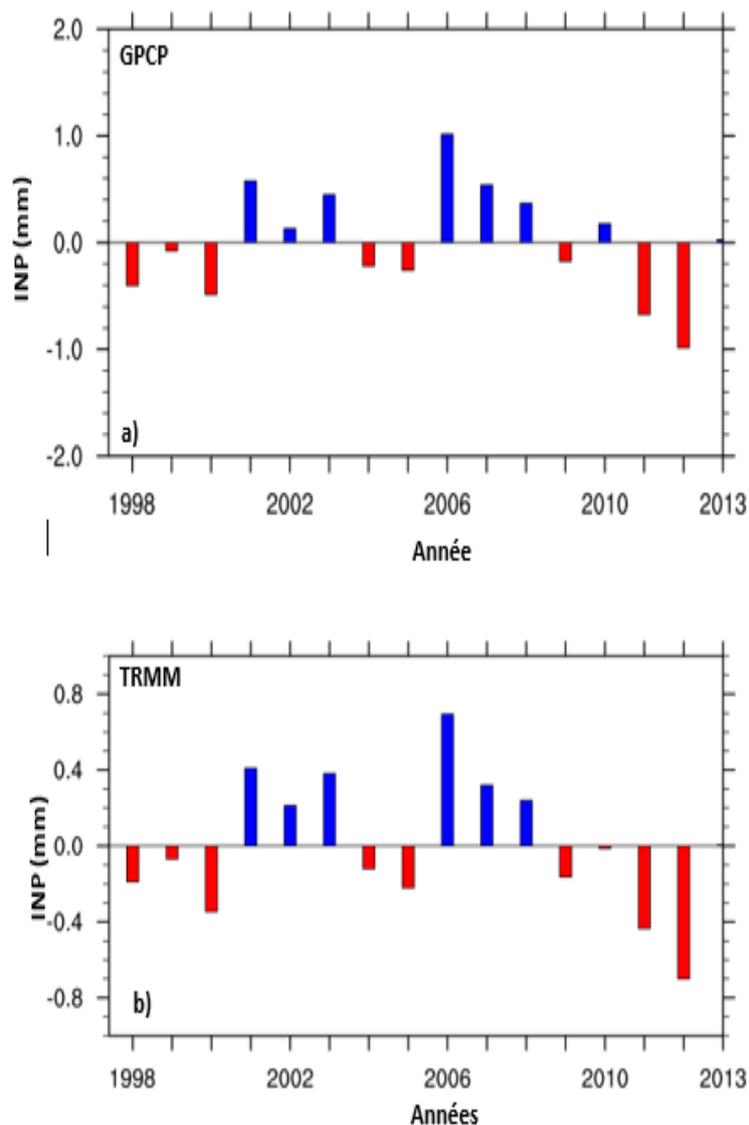


Figure 3.5 – Variabilité interannuelle des INP à partir des données GPCP et TRMM pendant la saison AMJ, sur la période 1998-2013.

humides sont caractériser par des humidités modérées ($0 < \text{INP} < 1$). On constate une baisse du INP à partir de l'année 2006.

Après cette étude sur la variabilité interannuelle de l'indice standardisé des précipitations nous pouvons dire de manière globale que notre zone d'étude a enregistré des périodes soit modérément sèches soit modérément humides. Nous constatons aussi une baisse du INP beaucoup plus prononcé à partir de l'année 2006. Comme nous avons représenté et commenté la variabilité de l'indice normalisé des précipitations il sera intéressant de représenter leurs distributions pour mieux observer comment ils varient dans la sous-région.

3.2.1 Distribution spatiale de l'indice normalisé des précipitations

La distribution spatiale de l'indice normalisé des précipitations pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013 nous permettra d'évaluer le caractère sec ou humide du climat à travers notre région d'étude.

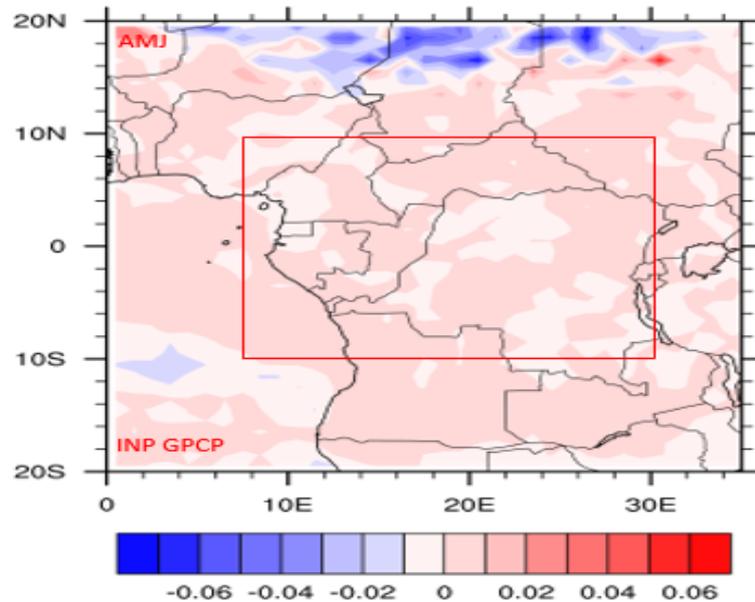


Figure 3.6 – distribution spatiale du INP pour la saison AMJ des données GPCP durant les années (1998-2013). Le carré sur la figure représente notre zone d'étude.

La figure 3.6 nous montre la distribution spatiale du INP pour la saison AMJ des données GPCP durant les années 1998-2013 dans la région de l'Afrique centrale. Nous observons des zones marquées par des conditions modérément sèche ($INP < 0$) le long des côtes du Cameroun. Ces conditions de sécheresse modérée s'observent aussi à travers la RDC et sur les côtes nigérianes. Les valeurs les plus faibles du INP ($INP < -0.06$) caractérisant également une sécheresse modérée sont repérées au nord de l'Afrique Centrale. Les sécheresses les plus marquées sont repérées à l'extrême nord et à l'extrême sud de notre région d'étude. Le reste de notre zone d'étude est caractérisé par une humidité modérée comme par exemple l'Angola, le Congo, la RCA qui sont globalement humide sur l'ensemble de territoire.

La figure 3.7 représente la distribution spatiale du INP pendant la saison AMJ des données TRMM sur la période 1998-2013. Nous remarquons que la répartition du INP n'est pas de symétrie particu-

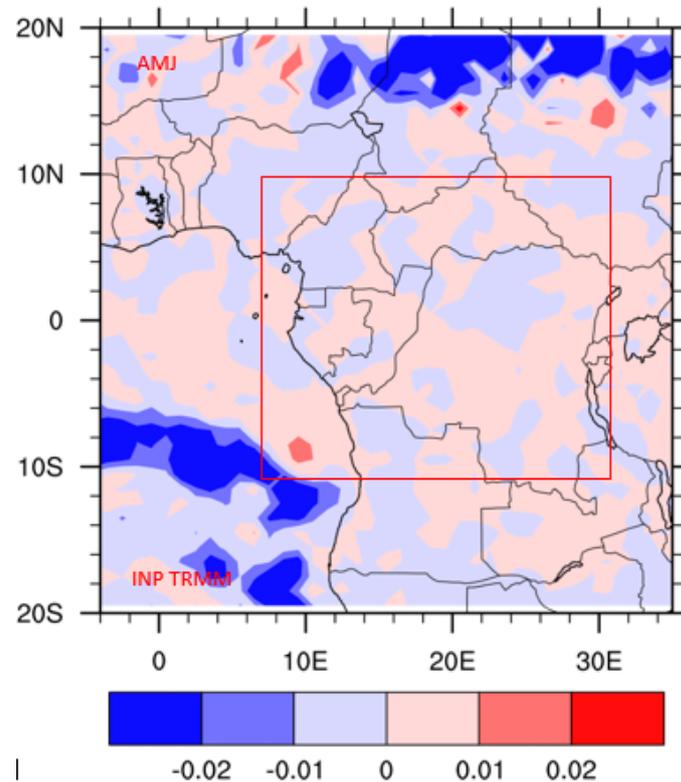


Figure 3.7 – Distribution spatiale du INP pour la saison AMJ des données TRMM pour la période (1998-2013).

lière comme c'est le cas avec les précipitations. On dira donc qu'il ya une distribution hétérogène dans l'espace des valeurs du INP. Dans notre région d'étude on observe des zones ayant un climat modérément humide ($-1 < \text{INP} < 0$) et des zones dominées par un climat modérément sec ($0 < \text{INP} < 1$). Nous concluons que d'une manière générale que dans la région d'étude nous avons des conditions climatiques soit modérément sèches ou humides pendant la saison AMJ, sur la période 1998-2013. La baisse du cumul des précipitations moyennes observée lors de l'analyse des précipitations des données TRMM et GPCP fait plus haut est en accord avec les études menées précédemment qui montrent que la région de l'Afrique centrale connaît une baisse du cumul de pluies qui est devenue assez prononcée au début des années 1980 [1], [2]. Cette baisse est associée à une distribution spatiale hétérogènes des zones sèches et humides à travers la région.

Suite à cette baisse du cumul de pluies nous essayerons de comprendre l'impact de cette baisse dans l'hydrologie à travers l'étude du Palmer Drought Severity Index.

3.3 Étude de la baisse de précipitations sur Palmer Drought Severity Index (PDSI)

3.3.1 Étude de la variabilité annuelle du PDSI

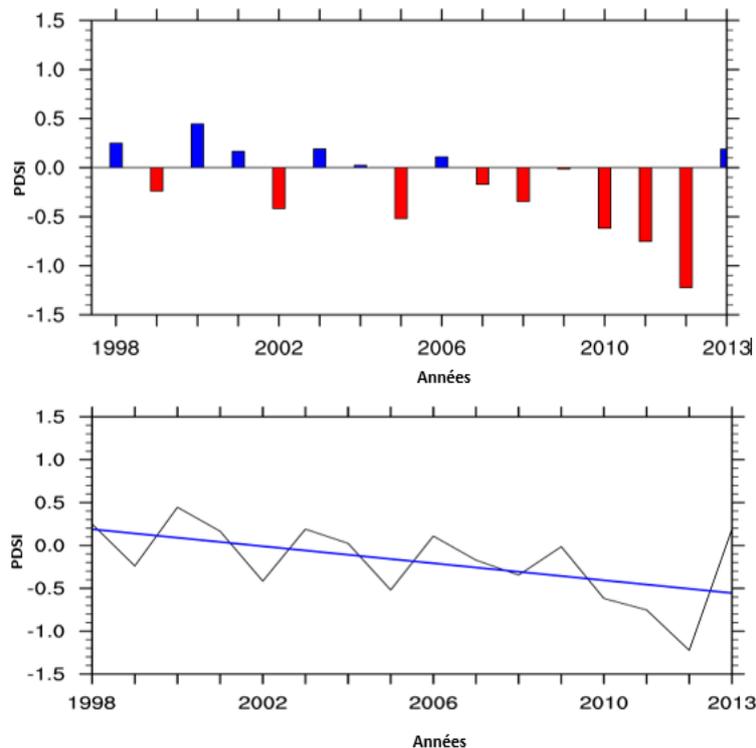


Figure 3.8 – Variabilité interannuelle du Palmer Drought Severity Index pendant la saison (AMJ) pour la période 1998-2013..

La figure 3.8 présente la variabilité interannuelle du PDSI pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013. Nous observons sur la figure 3.8 a) une alternance des périodes sèches et humides. Le nombre d'années ayant un PDSI positif (07) est inférieure à celui des années à PDSI négatifs (09). Les années à sc-PDSI positifs 1998, 2000, 2001, 2003, 2004, 2006, 2013 ont tous des valeurs inférieures à 0.5. Ce résultat montre que au cours de ces années les régimes hydrologiques n'ont pas connu une variation. Les ayant un PDSI négatif sont 1999, 2002, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 avec la valeur la plus basse observée en 2012 (PDSI=-1.3). Ces années à valeurs du PDSI négative traduisent une sécheresse hydrologique et l'année 2012 est la seule qui traduit une sécheresse hydrologique forte. On remarque une sécheresse renforcée à partir de l'année 2007.

La figure 3.8 b) nous montre la tendance générale à la baisse de la valeur du PDSI sur toute la période avec un coefficient du régression égale à -0.55. La tendance décroissante du PDSI sur l'ensemble de la période pourrait conduire à des sècheresses phréatiques et à un déficit d'écoulement des cours d'eau.

3.3.2 distribution spatiale du PDSI

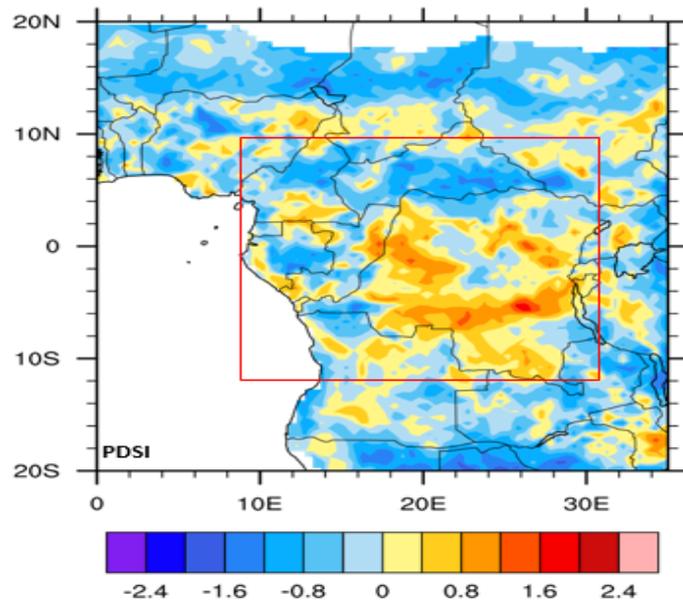


Figure 3.9 – Distribution spatiale du PDSI pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013. Le carré représenté sur la figure correspond à notre zone d'étude.

La figure 3.9 nous montre une distribution spatiale du Palmer Drought Severity index. Cette représentation spatiale est assez peu organisée dans l'espace, traduit ainsi son caractère très hétérogène. Les valeurs du PDSI sont comprises entre -2.4 et 2.4. Les valeurs les plus grandes du PDSI sont localisées principalement en RDC (égale à 2.4). On observe aussi quelques zones à valeurs de PDSI positives ($0 < \text{PDSI} < 1$) notamment au nord et au sud du Cameroun, et quelques zones aussi en Angola. La majeure partie de l'extrême nord et sud qui entoure notre zone d'étude est caractérisée par des valeurs du PDSI négatives avec certaines zones à valeurs du $\text{PDSI} < -1.6$. Ces valeurs négatives assez prononcées traduisent un renforcement des conditions de sècheresses liés à l'hydrologie. Nous concluons cette partie en disant que l'indice PDSI est reparti dans l'espace de manière homogène. Nous pouvons sur la base des commentaires dire que les sècheresses liées à l'hydrologie sont beaucoup plus prononcées

sur certains lieux que dans d'autres. Le paragraphe qui suivra nous permettra d'apprécier la tendance spatiale du Palmer Drought Severity index.

3.3.3 Tendances spatiales du PDSI

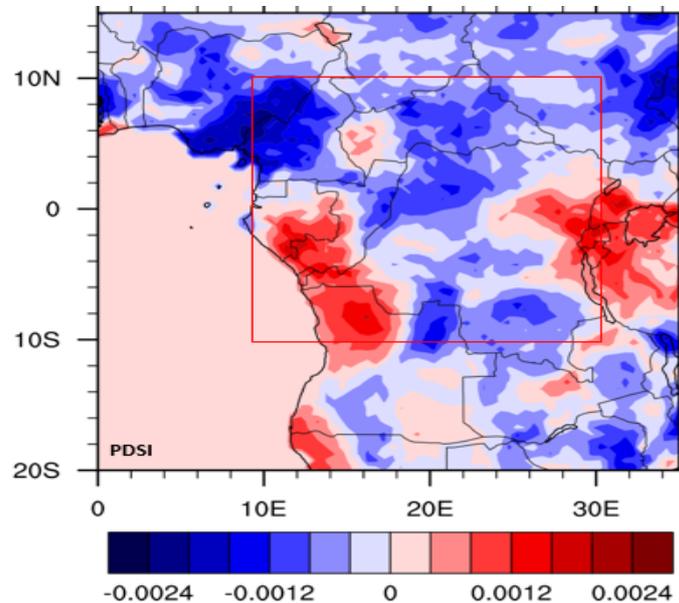


Figure 3.10 – Tendances spatiales du PDSI pendant la saison AMJ pour la période 1998-2013. Le carré trace dans la figure représente notre zone d'étude.

La figure 3.10 présente la distribution des tendances du PDSI pendant la saison AMJ durant les années 1998-2013. Nous observons une tendance générale à la baisse du PDSI sur toute la période d'étude. Les pentes des droites de régression du PDSI varient entre -0.0024 et 0.0024. Les tendances à valeurs positives sont principalement observées sur trois zones. La première zone est située entre la latitudes 1°N - 12°S et la longitude 12°E - 17°E . La seconde est située entre la latitude 10°N – 8°S et la longitude 28°E - 35°E . La troisième zone qui est la dernière est située entre la latitude 16°S - 20°S et la longitude 12°E - 15°E . Le reste de la zone est d'une manière générale commandé par une tendance négative. On peut citer la zone située entre la latitude 4°N - 15°N et de longitude 12°E - 15°E , le sud de la RDC, la zone située entre la latitude 14°E - 16°E et la longitude 14°S - 20°S , et la zone située entre la latitude 14°S - 20°S et la longitude 24°E - 35°E .

Le but de ce chapitre était de présenter les différents résultats obtenus au cours de notre analyse. Nous avons d'abord constaté une tendance générale à la baisse de pluie sur toute la période d'étude.

Nous avons ensuite constaté que cette baisse de pluie surtout prononcée depuis 2006 cause une sécheresse des régimes hydrologiques dans certaines zones tel que le sud et l'ouest Cameroun, la RCA.

3.4 Impacts de la sécheresse hydrologique dans les grands fleuves

Manifestement, la sécheresse hydrologique dans la région des grands fleuves donne lieu à des impacts complexes et variés qui se manifestent à diverses échelles temporelles et spatiales. Plusieurs conclusions d'études sur les impacts de la sécheresse hydrologique convergent dans le même sens. Ces résultats permettent de dégager les principales répercussions économiques, sociales et environnementales anticipées dans l'hydrosystème.

3.4.1 Production d'hydroélectricité

Des apports hydrauliques inférieurs, consécutifs à une période de sécheresse, entraîneraient une réduction de la production hydroélectrique.

3.4.2 Navigation commerciale

La sécheresse hydrologique peut nuire à l'industrie maritime sur les Grands Lacs de multiples façons. Lorsque les navires marchands circulent dans les Grands Lacs, ils doivent respecter des normes de dégagement net sous quilles. Selon [33], le dégagement net sous quilles se définit essentiellement comme « la distance entre la profondeur nominale du chenal et la partie la plus basse de la quille du navire lorsqu'il est à l'arrêt en eaux calmes ».

3.4.3 Santé publique

L'approvisionnement en eau potable constitue un enjeu de santé publique de premier ordre. Notons que la prolifération des algues est favorisée par des conditions de sécheresses et que les problèmes d'altération du goût et de la couleur peuvent être associés à la décomposition des plantes et des algues. Ainsi, une accentuation de l'intensité et de la récurrence de ces événements engendrerait des traitements additionnels pour assurer une eau potable adéquate [34].

3.4.4 Température d'eau

Des conditions de sécheresse hydrologique engendrent une augmentation de la Température de l'eau qui pourrait donner lieu à des modifications significatives dans L'écosystème des grands fleuves.

IMPLICATIONS PEDAGOGIQUES

Introduction

Ce chapitre vise à montrer l'apport de notre analyse faite précédemment sur le système éducatif. De voir dans quelle mesure les différents maillons de la chaîne du système éducatif pourront l'utiliser pour rendre les enseignements plus efficaces. De e fait, le canevas adopté dans ce chapitre est le suivant : intérêt didactique, l'apport chez l'enseignant, l'apport chez les élèves.

4.1 DEFINITION DES CONCEPTS

La sécheresse : peut se définir comme un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminé.

Precipitation : c'est la condensation de la vapeur d'eau sous forme humide ou gazeuse.

INP : (Indice Normalisé des Précipitations) est un indice permettant de voir comment au cours d'une année, les précipitations s'éloigne de la normale.

Le changement climatique : modification des caractéristiques climatique, échelonnées sur une période allant de quelques décennies à plusieurs siècles.

Hydrologie : sciences qui étudie l'ensemble des processus de circulation de l'eau sur une planète.

4.2 Intérêt didactique

La didactique est une science ayant pour objet l'étude des questions posées par léenseignement et l'acquisition des connaissances dans les différentes disciplines scolaires.

Dans les chapitres précédents, nous avons fait l'analyse de la pluviométrie en Afrique centrale et montrer la relation existant entre les précipitations et les sécheresses. L'apport didactique de notre

travail dans les programmes officiels de physique, chimie et technologique se situe dans les classes de cinquième, quatrième et troisième. Ceci par ce que notre travail est :

En classe de cinquième, un outil d'illustration des transformations physiques de l'eau vu dans le module 2 et intitulé La matière : Ses propriétés et ses transformations. En effet lorsqu'on parle de précipitations on voit le cycle de l'eau qui commence par l'eau liquide qui sous l'effet de la chaleur du soleil s'évapore et se transforme en gaz puis lors de son ascendance elle se condense et donne lieu à des précipitations liquides ; ou à une certaine température au-dessus du sol elle peut se solidifier et donner lieu à des précipitations solides.

En gros-modo notre étude faite sur les précipitations et sur les inondations apporte beaucoup d'illustration pour montrer le but de l'enseignement de la discipline de physique, chimie et technologique au secondaire. Ce sujet de mémoire touche aussi d'autres disciplines du secondaire comme par exemple la géographie. En effet dans notre travail nous avons analysé la répartition de la pluviométrie en Afrique centrale et on a vu aussi les caractéristiques des précipitations qui sont un des paramètres dérivant le climat d'une région. Ainsi un élève professeur, ou un professeur de lycées et collèges trouvera dans ce travail tous les éléments nécessaires pour expliquer la variabilité du climat et de leur impact sur l'environnement aux élèves des classes de 6e et de 2nde de l'enseignement secondaire général, car l'étude climatique du Cameroun pays de l'Afrique centrale font partir de leur programme officiel.

Dans ce travail est basé sur des méthodes purement statistiques. De ce fait elle permettra aux didacticiens de mathématiques de choisir des méthodes d'enseignement plus pratiques et plus concrètes.

4.3 Apports chez les enseignants.

Ce sujet de mémoire permettra à l'enseignant de physique, chimie et technologie ou de géographie de faire un lien entre ses enseignements et les phénomènes quotidiennes de l'environnement de l'élève. L'enseignant l'utilisera pour captiver l'attention des élèves et de les rendre compétent et aptes à la résolution, l'explication des phénomènes naturels qui l'entourent. Par exemple les précipitations et les sécheresses

4.4 Apports chez les élèves.

L'analyse faite dans les chapitres précédents permettra aux élèves de consolider les acquis reçus en classe, de le motiver à améliorer sa relation, sa connaissance, et son ouverture à l'environnement. De leur donner des outils nécessaires à la conduite des activités intégratrices concernant la pollution et les transformations physiques de l'eau, les analyses statistiques et les variabilités climatiques de l'Afrique centrale et plus particulièrement du Cameroun. En résumé au vu de nos analyses et résultats obtenus, notre étude portée sur l'analyse de l'impact du changement climatique sur les indices hydrologiques pluviométrie dans la région de l'Afrique centrale : est une véritable richesse et un outil de travail pour mettre en place les nouvelles approches d'enseignement entrées sur l'approche par les compétences. Ceci par ce qu'elle touche à la fois plusieurs disciplines ou domaines d'étude du programme officiel des enseignements des lycées et collèges.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principale de notre travail était de caractériser l'impact de la baisse observée des précipitations sur l'hydrologie en Afrique centrale pendant la saison AMJ. Pour ce faire nous avons utilisé deux jeux de données de précipitations TRMM et GPCP durant les années 1998-2013. Le résultat final de notre travail est qu'il y a un déficit hydrologique associé à la baisse de la pluviométrie observée depuis 2006.

Afin d'aboutir à ce résultat, nous sommes tout d'abord partis de l'étude du cycle annuel, de la distribution spatiale et de la variabilité interannuelle des précipitations. Le cycle annuel nous montrait que durant les années 1998-2013 il y a eu une baisse de pluies pendant les années 1998-2013. La variabilité interannuelle a permis de mieux caractériser la baisse de pluies durant la saison AMJ et nous a permis de voir un déficit général de pluie sur la période d'étude pendant cette saison avec une accentuation du déficit à partir de l'année 2007. La distribution interannuelle nous a permis de voir comment ont varié les précipitations dans la région.

Ensuite nous avons analysé la distribution spatiale et la variabilité interannuelle de l'indice standardisé des précipitations. La variabilité interannuelle nous a permis d'observer les périodes sèches et humides. On a aussi observé un renforcement de la sécheresse depuis l'années 2006. La distribution spatiale du INP nous a permis de voir les zones sèches et humides dans notre région d'étude.

Afin nous avons analysé la variabilité interannuelle, la distribution spatiale et la distribution spatiale de la tendance du PDSI. La variabilité interannuelle du PDSI nous a permis de déduire sur la base des observations, un renforcement de sécheresse hydrologique depuis l'année 2006. La distribution spatiale nous a permis d'observer les zones de déficits de régimes hydrologique et les zones d'augmentation de régimes hydrologique. De ce fait nous avons observé que les zones les plus touché par ce déficit sont le sud et ouest du Cameroun et la RCA et que l'une des régions à augmentation de débit des cours est la RDC. La distribution spatiale nous a aussi permis de voir que notre zone est impactée par un assèchement des régimes hydrologique qu'une augmentation de ces régimes pendant la saison AMJ durant les années 1998-2013.

Ce travail ouvre de nombreux perspectives pour l'étude du climat et des régimes hydrologiques de l'Afrique centrale. Nous pouvons poursuivre nos études sur la Comparaison des régimes hydrologiques pendant la saison AMJ entre les années 1998-2013 et les années qui les précèdent.

Bibliographie

- [1] Giannini, A., Biasutti, M., Held, I. M., Sobel, A. H. (2008) A global perspective on African climate. *Climatic Change*, 90(4), 359-383.
- [2] Maidment, R. I., Allan, R. P., Black, E. (2015). Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa. *Geophysical Research Letters*, 42(19), 8155-8164.
- [3] Zeng, N. (2003). Drought in the Sahel. *Science*, 302(5647), 999-1000.
- [4] Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., Xie, P. (2004). The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology : A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(11), 1323-1331.
- [5] Williams, A. P., Funk, C. (2011). A westward extension of the warm pool leads to a westward extension of the Walker circulation, drying eastern Africa. *Climate Dynamics*, 37(11-12), 2417-2435.
- [6] Lyon, B., DeWitt, D. G. (2012). A recent and abrupt decline in the East African long rains. *Geophysical Research Letters*, 39(2).
- [7] Yang, W., Seager, R., Cane, M. A., Lyon, B. (2014). The East African long rains in observations and models. *Journal of Climate*, 27(19), 7185-7202.

- [8] Richard, Y., Fauchereau, N., Pocard, I., Rouault, M., Trzaska, S. (2001). 20th century droughts in southern Africa : spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions. *International Journal of Climatology*, 21(7), 873-885.
- [9] Hoerling, M., Hurrell, J., Eischeid, J., Phillips, A. (2006). Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change. *Journal of climate*, 19(16), 3989-4008.
- [10] Washington, R., James, R., Pearce, H., Pokam, W. M., Moufouma-Okia, W. (2013). Congo Basin rainfall climatology : can we believe the climate models ?. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 368(1625), 20120296.
- [11] Mpounza, M., Samba-Kimbata, M. J. (1990). Aperçu sur le climat de l'Afrique centrale occidentale. *Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*, ORSTOM, 31.
- [12] Godard, A., Tabeaud, M. (2009). *Les climats : Mécanismes, variabilité et répartition*. Armand Colin.
- [13] Gonmadje, C., Doumenge, C., Bonaventure, S. (2010). *Analyse phytogéographique du Massif de Ngovayang (Cameroun)*. National Botanic Garden of Belgium.
- [14] MUGARUKA, B. T., KULIMUSHI, M. S., MUHINDO, S. W., DEWITTE, O. (2017). Glissement de terrain de Nyakavogo (Bukavu, RD Congo) : interaction entre facteurs naturels et anthropiques. *Geo-Eco-Trop*, 41(2), 249-262.
- [15] Tsalefac, M., Hiol Hiol, F., Mahé, G., Laraque, A., Sonwa, D. J., Scholte, P., ... Mkankam, F. K. (2015). *Climate of Central Africa : past, present and future*.

- [16] Tsalefac, M., Hiol Hiol, F., Mahé, G., Laraqe, A., Sonwa, D. J., Scholte, P., ... Mkankam, F. K. (2015). Climate of Central Africa : past, present and future
- [17] Jobard, B., Lefer, W. (2001). Multiresolution flow visualization.
- [18] Laraqe, A., Mahé, G., Orange, D., Marieu, B. (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology*, 245(1-4), 104-117.
- [19] Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., Brou, Y. T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1542-1558.
- [20] Boyer, T., Levitus, S., Antonov, J., Locarnini, R., Mishonov, A., Garcia, H., Josey, S. A. (2007). Changes in freshwater content in the North Atlantic Ocean 1955–2006. *Geophysical Research Letters*, 34(16).
- [21] Bele, M. Y., Sonwa, D. J., Tiani, A. M. (2014). Local communities vulnerability to climate change and adaptation strategies in Bukavu in DR Congo. *The Journal of Environment Development*, 23(3), 331-357.
- [22] Nicholson, S. E., Dezfuli, A. K. (2013). The relationship of rainfall variability in western equatorial Africa to the tropical oceans and atmospheric circulation. Part I : The boreal spring. *Journal of climate*, 26(1), 45-65.9
- [23] Munzimi, Y. A., Hansen, M. C., Adusei, B., Senay, G. B. (2015). Characterizing Congo basin rainfall and climate using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite data and limited rain gauge ground observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3), 541-555.

- [24] Todd, M. C., Washington, R. (2004). Climate variability in central equatorial Africa : Influence from the Atlantic sector. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- [25] Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., ... van Meijgaard, E. (2012). Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of Climate*, 25(18), 6057-6078.
- [26] Bodamer, O. A., Hoffmann, G. F., Lindner, M. (2007). Expanded newborn screening in Europe 2007. *Journal of inherited metabolic disease*, 30(4), 439-444.
- [27] Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P. P., Janowiak, J., ... Gruber, A. (2003). The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167.
- [28] ELDIN, M., 1971. Le clima Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., Rudolf, B. (2014). GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2), 15-40.t, in : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire (Avenard et al)*. Mém. ORSTOM, Paris, 50, 391 p.
- [29] BERGAOUI, M., Alouini, A. W. S. (2002). Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 12(4), 205-13.

- [30] Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- [31] Verma, S. B., Rosenberg, N. J., Blad, B. L. (1978). Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. *Journal of Applied Meteorology*, 17(3), 330-338.
- [32] Haensler, A., Saeed, F., Jacob, D. (2013). Assessing the robustness of projected precipitation changes over central Africa on the basis of a multitude of global and regional climate projections. *Climatic Change*, 121(2), 349-363.
- [33] Fossey, M., Rousseau, A. N. (2016). Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. *Journal of environmental management*, 184, 327-339.
- [34] Talbot, J., Plamondon, A. P., Levesque, D., Aube, D., Prevos, M., Chazalmar-tin, F., Gnocchini, M. (2006). Relating snow dynamics and balsam fir stand characteristics, Montmorency Forest, Quebec. *Hydrological Processes : An International Journal*, 20(5), 1187-1199.