



ANNÉE UNIVERSITAIRE

2023-2024

N° D'ORDRE :

.....108.....

Prénoms : Daouda

NOM : KONATE

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Formation doctorale

Mention : Géosciences et Environnement

Spécialité : Hydroclimatologie

THÈME :

**Analyse de la variabilité hydro-climatique
et production de l'énergie hydraulique :
Cas du barrage hydroélectrique de Buyo
(Côte d'Ivoire)**

JURY

Président : M KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, Hydro-Sédimentologie, Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Hydrologie, Université Jean Lorougnon Guédé

Rapporteur : M. KOUASSI Amani Michel, Professeur Titulaire, Hydrologie-Hydrogéologie, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB)

Examineur : M. KOUADIO Kouassi Yves, Professeur Titulaire, Interaction Océan-Atmosphère, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan

Examineur : SORO Gneneyougo Emile, Maître de Conférences, Hydrologie, Université Nangui Abrogoua, Abidjan



ANNÉE UNIVERSITAIRE

2023-2024

N° D'ORDRE :

.....108.....

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Formation doctorale

Mention : Géosciences et Environnement

Spécialité : Hydroclimatologie

THÈME :

**Analyse de la variabilité hydro-climatique
et production de l'énergie hydraulique :
Cas du barrage hydroélectrique de Buyo
(Côte d'Ivoire)**

Prénoms : Daouda

NOM : KONATE

JURY

Président : M KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, Hydro-Sédimentologie, Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Hydrologie, Université Jean Lorougnon Guédé

Rapporteur : M. KOUASSI Amani Michel, Professeur Titulaire, Hydrologie-Hydrogéologie, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB)

Examineur : M. KOUADIO Kouassi Yves, Professeur Titulaire, Interaction Océan-Atmosphère, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan

Examineur : SORO Gneneyougo Emile, Maître de Conférences, Hydrologie, Université Nangui Abrogoua, Abidjan

Table des matières	Pages
DÉDICACE	v
REMERCIEMENTS	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ANNEXES	xv
INTRODUCTION	1
PARTIE I : GÉNÉRALITÉS	5
Chapitre 1 : Généralités sur le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	6
Introduction partielle	6
1.1. Situation géographique.....	6
1.2. Caractéristiques climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo.....	7
1.2.1. Zone climatique I : Climat tropical de transition atténuée	8
1.2.2. Zone climatique II : Climat de montagne.....	8
1.2.3. Zone climatique III : Climat équatorial de transition atténuée.....	8
1.3. Caractérisation physique du bassin versant.....	9
1.3.1. Relief	9
1.3.2. Réseau hydrographique	10
1.3.3. Aménagement hydroélectrique du bassin versant du fleuve Sassandra	11
1.3.4. Activités socioéconomiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	14
1.3.5. Végétation	14
1.3.6. Géologie et pédologie.....	15
Conclusion partielle.....	16
Chapitre 2 : Variabilité et changement climatique, modélisation climatique et modélisation hydrologique, barrage et fonctionnement	18
Introduction partielle	18
2.1. Sécheresse, variabilité et changement climatique	18
2.1.1. Sécheresse	18
2.1.2. Climat et changement climatique	20
2.1.3. Variabilité climatique.....	24

2.1.4. Changements climatiques et variabilité pluviométrique	25
2.1.5. Phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation)	26
2.2. Méthodes d'interpolation, modélisation climatique et hydrologique.....	27
2.2.1. Méthodes d'interpolation	27
2.2.2. Modélisation climatique.....	30
2.2.3. Modélisation hydrologique	38
2.3. Barrage et fonctionnement	46
Conclusion partielle.....	47
PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES	48
Chapitre 3 : Données et Matériel	48
Introduction partielle	48
3.1. Données de l'étude	48
3.1.1. Données climatiques	48
3.1.2. Données hydrométriques.....	48
3.1.3. Données de sorties de modèles climatiques régionaux	51
3.2. Outils de traitement des données.....	52
3.2.1. Logiciels de bureautique	53
3.2.2. Logiciel de cartographie ArcGis 10.8	53
3.2.3. Modèle GR4J.....	53
3.2.4. Outil de correction des sorties de modèles climatiques régionaux	59
3.2.5. Logiciel R-Studio	60
Conclusion partielle.....	61
Chapitre 4 : Méthodes.....	62
Introduction partielle	62
4.1. Contrôle et comblement des données climatiques et hydrologiques.....	62
4.1.1. Contrôle des données climatiques	62
4.1.2. Contrôle des données hydrométriques et de niveaux d'eau	63
4.2. Caractérisation de la variabilité climatique et hydrologique.....	63
4.2.1. Caractérisation de la variabilité climatique	63
4.2.2. Caractérisation de la variabilité hydrologique	71
4.3. Caractérisation de la variabilité climatique future	74

4.3.1. Choix de modèle.....	74
4.3.2. Évaluation des changements climatiques futurs.....	75
4.3.3. Évaluation des impacts des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant	77
4.4. Impacts de la variabilité climatique sur la production de l'électricité	81
4.4.1. Détermination de la lame d'eau utile	81
4.4.2. Classification du niveau de vigilance sur l'évolution temporelle de la lame d'eau	82
4.4.3. Projection climatique et scénario d'évolution de la lame d'eau.....	83
Conclusion partielle.....	83
PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION	79
Chapitre 5 : Caractérisation hydro-climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	80
Introduction partielle	80
5.1. Variabilité climatique	80
5.1.1. Analyse spatiale des normales pluviométriques.....	80
5.1.2. Analyse des variations des normales pluviométriques 1971-2000 et 1991-2020 par rapport à la normale 1981-2010	82
5.1.3. Décennales pluviométriques	82
5.1.4. Indices climatiques.....	85
5.2. Variabilité hydrologique.....	98
5.2.1. Comblement des débits manquants	98
5.2.2. Normales et décennales hydrologiques	99
5.2.3. Indices hydrologiques	100
Discussion	104
Conclusion partielle.....	107
Chapitre 6 : Caractérisation hydro-climatique future du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	108
Introduction partielle	108
6.1. Modèles climatiques adaptés à la zone d'étude.....	108
6.1.1. Diagramme de Taylor.....	108
6.1.2. Modèles retenus.....	113

6.2. Potentiels changements du climat futur.....	114
6.2.1. Correction des sorties de modèles.....	114
6.2.2. Estimation des changements futurs.....	118
6.3. Évaluation des impacts hydrologiques des changements climatiques	129
6.3.1. Détermination de la pluie et de l’ETP moyennes.....	129
6.3.2. Simulation des écoulements	129
6.3.3. Impacts des changements climatiques sur les écoulements	131
Discussion	134
Conclusion partielle.....	136
Chapitre 7 : Impacts changements climatiques sur la production de l’énergie hydroélectrique du barrage de Buyo	138
Introduction partielle	138
7.1. Variation pluviométrique associées aux phénomènes climatiques	138
7.2. Variation thermique.....	141
7.3. Analyse de l’évolution temporelle de la lame d’eau	143
7.3.1. Impacts actuels du climat sur la production d’énergie hydroélectrique.....	144
7.3.2. Analyse de l’influence de la pluviométrie sur les écoulements	145
7.4. Impacts projetés du climat sur la production d’énergie hydroélectrique	147
7.4.1. Pluviométrie	147
7.4.2. Température	148
Discussion	150
Conclusion partielle.....	151
CONCLUSION.....	154
RÉFÉRENCES.....	158
ANNEXES	
PUBLICATIONS	
RÉSUMÉ	

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à :

- À la mémoire de mes parents ;

Ma mère Hadja Naminata TIMITE et mon père KONATE Dramane, que Dieu Tout Puissant leur accorde sa miséricorde.

- A mes frères et sœur : Man, Moussa, Yacou, Drissa, Bakary, Lanzeny et Mamadou ;
- À mon épouse Mariam et mes enfants Aminata Nakeem, Aminata (Hadja), Mohamed qui m'ont soutenu et encouragé dans la réalisation de travail.

Trouvez tous dans ce travail, la récompense et les joies de tous les efforts que vous avez consentis pour moi.

REMERCIEMENTS

Ce présent travail a vu la contribution de plusieurs personnes, dont il convient de leur exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude. Je voudrais à travers ces quelques lignes, leurs adresser mes sincères remerciements.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude au Professeur ADOHI KROU Viviane, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans ladite Université.

Je remercie également le Professeur SORO Dognimeton, Vice-président de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) chargé de la pédagogie, de la recherche, de la vie universitaire et de l'innovation technologique pour avoir coordonné la mise en place de la formation doctorale.

J'exprime mes sincères remerciements au Professeur KONE Issiaka, Vice-président de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) chargé de la planification, de la programmation et des relations extérieures pour son implication dans le bon déroulement de la formation doctorale.

Je suis reconnaissant au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour sa simplicité, ses grandes qualités humaines, sa disponibilité, ses conseils avisés durant toutes ces années de thèse.

Je tiens également à remercier Professeur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé, de m'avoir accepté au sein dudit laboratoire pour la réalisation de mon mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences qui n'a ménagé aucun effort dans la Direction de ce travail. Je rends ici hommage à ses qualités humaines (très patient et compréhensif), pédagogiques et scientifiques. Je salue la pertinence de ses interventions, ses explications sans cesse qui se sont toujours révélées utiles, voire déterminantes pour l'aboutissement de ce travail. Je lui suis infiniment reconnaissant de m'avoir appris les premiers pas dans la recherche et m'inculqué l'intérêt pour la recherche.

Je n'oublie pas les enseignants-chercheurs et chercheurs du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé pour leur appui dans la réalisation de ma thèse.

J'exprime ma reconnaissance au Directeur Général de la SODEXAM, Monsieur Jean Louis pour ses encouragements dans la réalisation de mes travaux de thèse.

Je voudrais très sincèrement traduire ma reconnaissance toute particulière à Docteur DJE Kouakou Bernard, Chef Département Climatologie et des Applications Climatologiques pour son implication personnelle et avérée dans la réalisation de ce travail. Il a été au début et aujourd'hui à la fin. Merci pour ton amitié, ton dévouement et ton amour pour le travail bien fait.

Je remercie également Professeur Arona DIEDHIOU pour ses conseils et encouragements pour l'aboutissement de ce travail.

Que les doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) : N'GUESSAN Konan Jean Yves, KONATE Yaya, KOUASSI Amoin Anne-Marie, KOUASSI Kouassi Jean Michel, OUEDE Gla Blaise, KADJO M'min Marie-Florence, COULIBALY Wawogninlin Brice, GOE Bi Séhi Antoine, AKAFFOU Franck Hervé, KRE Yon Edwige, YAO Anne Josianne Larissa, TUO Yaraba, YAO Emile Desmond et COULIBALY K. Ryflard trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. J'ai pu bénéficier de leurs assistances durant tout ce travail.

J'exprime un remerciement spécial à COULIBALY Zana Mohamed, pour son appui à toutes les étapes de la réalisation de mon travail de recherche.

J'aimerais aussi remercier tous les agents de la SODEXAM et particulièrement Docteur COULIBALY Kolotioloma Alama, Chef de Service Climatologique et Monsieur KASSI Nicaise, Chargé d'étude qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Aux responsables du barrage de Buyo et de la CIE de la région, j'adresse mes sincères remerciements pour les entretiens fructueux qui ont permis d'élucider plusieurs points d'ombre et d'améliorer le travail et la mise à disposition des données hydrologiques sur le barrage de Buyo.

Par crainte d'avoir omis quelqu'un, je témoigne ma reconnaissance et mon infinie gratitude à tous ceux et celles qui m'ont apporté un soutien quelconque pour l'aboutissement de ce travail et dont les noms n'ont pas été cités.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AAE	: Average Absolut Error
ARSO	: Aménagement de la Région du Sud-Ouest
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CEMAGREF	: Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts
CMIP	: Coupled Model Intercomparaison Projet
CORDEX	: Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
DMN	: Direction de la Météorologie Nationale
EDF	: Energie de France
ERA-Interim	: ECMWF global atmospheric reanalysis from 1979, continuously updated in real time.
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
ETR	: Evapotranspiration Réelle
FAO	: Food and Agriculture Organization
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
GR2M	: Génie Rural à 2 paramètres Journaliers
GR4J	: Génie Rural à 4 paramètres Journaliers
HadGEM2	: Hadley Centre Global Environment Model version 2
HEC	: Hidrologic Engineering Center
ILDH	: Indice Logarithme Décimal des déviations Hydrologiques
IPSL	: Institut Pierre Simon Laplace
ISD	: Indices de Sécheresse des Débits
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MCG	: Modèle de Circulation Générale
MCRs	: Modèles Climatiques Régionaux

MPI	: Max Planck Institut
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
RCP	: Representative Concentration Pathway
RMSE	: Root Mean Square Error
SHE	Systeme hydraulique Européen
SIR	: Société Ivoirienne de Raffinage
SMHI	: Swedish Meteorological and Hydrological Institut
SODEXAM	: Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique
SPI	: Standard Precipitaton Index
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Asseessment Tools
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
WASCAL	: West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land use

LISTE DES TABLEAUX	Pages
Tableau I : Caractéristiques des barrages de Buyo et de Soubré	13
Tableau II : Caractéristiques principales des RCP	33
Tableau III : Récapitulatif des stations hydro-climatiques de la zone d'étude	51
Tableau IV : Modèles climatiques régionaux et leurs origines	52
Tableau V : Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	58
Tableau VI : Classification des séquences de sécheresse climatiques selon l'ISP	64
Tableau VII : Indices des extrêmes des précipitations journalières	69
Tableau VIII : Indices des extrêmes des températures journalières	70
Tableau IX : Classification des séquences de sécheresse hydrologique selon l'IHN.....	72
Tableau X : Classification des séquences de sécheresse selon l'ILDH.....	73
Tableau XI : Classification des niveaux de vigilance.....	82
Tableau XII : Intensité et pourcentage des indices ISP des stations de la zone d'étude.....	93
Tableau XIII : Caractéristiques des indices des extrêmes climatiques	98
Tableau XIV : Caractéristiques des sous-bassins et des calages-validations du modèle GR4J ...	98
Tableau XV : Durée et fréquence des séquences de sécheresses à l'échelle mensuelle de 1971-2020	100
Tableau XVI : Séquences et intensités de la sécheresse hydrologique aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin	102
Tableau XVII : Modèles Climatiques retenus par zone climatique	114
Tableau XVIII : Biais estimés entre pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005.....	115
Tableau XIX : Biais estimés entre les températures observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005	116
Tableau XX : Projections climatiques selon le scénario RCP 4.5	119
Tableau XXI : Projections climatiques selon le scénario RCP 8.5.....	121
Tableau XXII : Valeurs des paramètres au calage et à la validation du modèle GR4J	130
Tableau XXIII : Récapitulatif des caractéristiques de la réponse hydrologique du bassin versant	132

Tableau XXIV : Indice de précipitation standardisé (SPI) et intensité de la sécheresse associée aux phénomènes climatiques aux stations de Daloa, Odienné et Man (1981-2022).....	140
Tableau XXV : Ecart de températures aux stations de Daloa, Odienné et Man comparés aux normales 1961-1990 et 1991-2020.....	142
Tableau XXVI : Intensité de sécheresse des années identifiées comme années critiques.....	145

LISTE DES FIGURES	Pages
Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	7
Figure 2 : Carte des zones climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	8
Figure 3 : Carte du relief du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	10
Figure 4 : Carte du réseau hydrographique du fleuve Sassandra à Buyo	11
Figure 5 : Barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré	13
Figure 6 : Carte de végétation du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	15
Figure 7 : Carte géologique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo	16
Figure 8 : RCP comparés aux SRES	34
Figure 9 : Trajectoires de réchauffement planétaire selon les cinq scénarios SSPx-y retenus dans le résumé pour décideur du GIEC	35
Figure 10 : Domaines du projet CORDEX	38
Figure 11 : Stations météorologiques et hydrométriques de la zone d'étude	50
Figure 12 : Schéma de la structure du modèle GR4J	54
Figure 13 : Procédure de correction des biais avec le CMhyd.....	60
Figure 14 : Schéma explicatif du principe des polygones de Thiessen.....	79
Figure 15 : Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des normales	81
Figure 16 : Écart de la moyenne des normales 1971-2000 et 1991-2020 par rapport à la normale 1981-2010.....	82
Figure 17 : Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des décennies	84
Figure 18 : Écart des moyennes décennales par rapport à la normale 1981-2010	85
Figure 19 : Évolution des indices ISP de la décennie 1971-1980 par rapport à la normale 1981-2010	87
Figure 20 : Évolution des indices ISP de la décennie 1981-1990 par rapport à la normale 1981-2010	88
Figure 21 : Évolution des indices ISP de la décennie 1991-2000 par rapport à la normale 1981-2010	89
Figure 22 : Évolution des indices ISP de la décennie 2001-2010 par rapport à la normale 1981-2010	90

Figure 23 : Évolution des indices ISP de la décennie 2010-2020 par rapport à la normale 1981-2010	91
Figure 24 : Indices de sécheresse pluviométrique dans le bassin versant du fleuve Sassandra	93
Figure 25 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station de Daloa .	95
Figure 26 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station de Man ...	96
Figure 27 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station d'Odienné	97
Figure 28 : Normales hydrologiques aux stations de Kahin et Piébli	99
Figure 29 : Décennales hydrologiques aux stations de Kahin et Piébli	100
Figure 30 : Indices IHN, ISD et ILD aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin	101
Figure 31 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station d'Odienné.....	109
Figure 32 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station de Daloa	110
Figure 33 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station de Man	111
Figure 34 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station d'Odienné	111
Figure 35 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station de Daloa.....	112
Figure 36 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station de Man.....	113
Figure 37 : Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles simulées et observées ...	113
Figure 38 : Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles simulées et observées	114
Figure 39 : Sorties de pluies corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping)	117
Figure 40 : Sorties des températures corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping).....	118
Figure 41 : Variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 4.5	120
Figure 42 : Variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP 4.5	120
Figure 43 : Variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 8.5	122
Figure 44 : Variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP8.5	122
Figure 45 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone de Daloa de 2021 à 2060	124
Figure 46 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone de Man de 2021 à 2060	125

Figure 47 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone d'Odienné de 2021 à 2060	126
Figure 48 : Températures moyennes attendues dans la zone de Daloa de 2021 à 2060.....	127
Figure 49 : Températures moyennes attendues dans la zone de Man de 2021 à 2060.....	128
Figure 50 : Températures moyennes attendues dans la zone d'Odienné de 2021 à 2060.....	129
Figure 51 : Hydrogrammes des débits observés et simulés au calage (a) et à la validation (b)..	130
Figure 52 : Hydrogrammes moyens des débits simulés et observés aux horizons 2030 et 2050	131
Figure 53 : Débits moyens annuels simulés aux horizons 2030 et 2050 et observés (1981-2010)	132
Figure 54 : Évolution interannuelle des débits entrants dans la retenue du barrage de Buyo aux horizons futurs.....	133
Figure 55 : Évolution interannuelle des indices de lame d'eau efficace sur la période 2005-2022	143
Figure 56 : Évolution interannuelle des indices de lame d'eau efficace des années critiques	144
Figure 57 : Profils pluviométriques et de débit sur le bassin versant de la rivière N'Zo à Kahin	146
Figure 58 : Profils pluviométriques et de débit sur le bassin versant du fleuve Sassandra à Piébli	146
Figure 59 : Caractéristiques des indices pluviométriques projetés de 2021 à 2060	148
Figure 60 : Anomalies de températures projetées dans le bassin versant du fleuve Sassandra...	149

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Évolution des températures mensuelles de 1971 à 2020.....	177
Annexe 2 : Évolution des températures annuelles de 1971 à 2020	177
Annexe 3 : Histogrammes en calage et validation du modèle GR4J à Piébli.....	177
Annexe 4 : Histogrammes en calage et validation du modèle GR4J à Kahin	178
Annexe 5 : Évolution des débits moyens annuels sur la période 1972-2020 aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin	178
Annexe 6 : Valeurs des paramètres statistiques du diagramme de Taylor des précipitations moyennes mensuelles.....	179
Annexe 7 : Valeurs des paramètres statistiques du diagramme de Taylor des températures moyennes mensuelles.....	179

RÉSUMÉ

En Côte d'Ivoire, la production de l'énergie hydroélectrique joue très grand rôle dans le mixte énergétique. Cette production dépend principalement des grands cours d'eaux qui sont sujets aux aléas climatiques. Les barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré produisent plus de la moitié de la production nationale en hydroélectricité. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. La méthodologie adoptée a consisté d'abord à faire une caractérisation hydro-climatique du bassin versant à l'aide des indices hydro-climatiques. Ensuite, la caractérisation hydro-climatique future aux horizons 2030 et 2050 par un choix de modèles MCRs dont les sorties ont été corrigées et utilisées pour l'estimation des impacts sur le climat et sur les écoulements. Enfin, l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la production de l'énergie du barrage hydroélectrique de Buyo où la démarche s'est basée sur l'analyse de la lame d'eau utile à la production de l'énergie. Les résultats de la variabilité hydro-climatique ont permis, d'une part, de relever des conditions prolongées de déficits hydro-pluviométriques depuis les années 1970 sur l'ensemble du bassin. D'autres parts, elle a relevé un retour pluviométrique vers la normale de la décennie 2011-2020. La caractérisation hydro-climatique future a permis de choisir et valider des modèles ICHEC, IPSL et NCC depuis la base de données CORDEX-Afrique afin de décrire le climat futur du bassin. Ainsi, le scénario RCP 4.5, prévoit des fluctuations de la pluviométrie de -20,8% à +58,1% à l'horizon 2030 et de -18,8% à +61,7% à l'horizon 2050. Le RCP 8.5 prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4% à +43,8% à l'horizon 2030 et de -7,5% à +73,3% à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1.6 à +4,4°C pour le RCP 4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP 8.5. Les résultats sur les écoulements simulés permettent de noter au niveau saisonnier, la conservation du régime hydrologique avec une modification du volume écoulé ainsi qu'une baisse du volume des écoulements à l'horizon 2050 (RCP4.5). Les écoulements annuels subiraient des hausses par rapport à la période 1981-2010. Au cours des années futures, il est prévu des augmentations des écoulements à l'horizon 2030 de 55% (RCP 4.5) et de 53% (RCP 8.5). Pour l'horizon 2050, le RCP 4.5 prévoit une augmentation de 2% et le RCP 8.5, une augmentation de 43%. Les écoulements baissent à l'horizon 2050, par rapport à 2030 (33%, RCP 4.5 et 7% RCP 8.5). Enfin, les résultats du troisième objectif spécifique montrent une distinction des années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022 par une variabilité plus marquée que d'autres qui coïncident avec des années de sécheresses climatiques. Au cours de ces années, le niveau de crise. Les résultats ont également montré que les projections futures du climat indiquent de fortes variations de la pluviométrie et des températures qui entraîneraient des sécheresses sévères à extrêmes au cours des années 2023, 2029, 2041 (RCP 4.5) et de 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 et 2059 (RCP 8.5). Ainsi, au cours des années où la sécheresse serait mise dans les classes de modérée à extrême, la lame d'eau pourrait être inférieure à la normale, ce qui pourrait entraîner une réduction de la production hydroélectrique.

Mots-clés : Energie hydroélectrique, variabilité hydro-climatique, fleuve Sassandra, Barrage de Buyo, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, hydroelectric power plays a major role in the energy mix. This production depends mainly on large rivers, which are subject to the vagaries of climate. The Buyo and Soubré hydroelectric dams produce more than half the country's hydroelectricity. This thesis is part of the fight against climate change. The methodology adopted first consisted of carrying out a hydro-climatic characterization of the watershed using hydro-climatic indices. Then, the future hydro-climatic characterization for 2030 and 2050 by a choice of MCR models whose outputs have been corrected and used to estimate the impacts on the climate and on flows. Finally, the assessment of the impacts of climate change on the energy production of the Buyo hydroelectric dam where the approach was based on the analysis of the layer of water useful for energy production. The results of hydro-climatic variability made it possible, on the one hand, to identify prolonged conditions of hydro-rainfall deficits since the 1970s across the entire basin. On the other hand, it noted a return to normal rainfall for the 2011-2020 decade. The future hydro-climatic characterization made it possible to choose and validate ICHEC, IPSL and NCC models from the CORDEX-Africa database in order to describe the future climate of the basin. Thus, the RCP 4.5 scenario forecasts fluctuations in rainfall from -20.8% to +58.1% by 2030 and from -18.8% to +61.7% by 2050. RCP 8.5 forecasts fluctuations in precipitation from -19.4% to +43.8% by 2030 and from -7.5% to +73.3% by 2050. All models predict an increase of the temperature according to the two scenarios from +1.6 to +4.4°C for RCP 4.5 and from +2.1 to +5°C for RCP 8.5. The results on the simulated flows make it possible to note at the seasonal level, the conservation of the hydrological regime with a modification of the flow volume as well as a drop in the flow volume by 2050 (RCP4.5). Annual flows would increase compared to the period 1981-2010. In future years, increases in flow are expected by 2030 of 55% (RCP 4.5) and 53% (RCP 8.5). For 2050, RCP 4.5 provides for an increase of 2% and RCP 8.5, an increase of 43%. Runoffs decrease by 2050, compared to 2030 (33%, RCP 4.5 and 7% RCP 8.5). Finally, the results of the third specific objective show a distinction between the years 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 and 2022 by a more marked variability than others which coincide with years of drought climatic. During these years, the crisis level. The results also showed that future climate projections indicate large variations in rainfall and temperatures that would lead to severe to extreme droughts during the years 2023, 2029, 2041 (RCP 4.5) and 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 and 2059 (RCP 8.5). Thus, in years where the drought would be classified as moderate to extreme, the water level could be lower than normal, which could lead to a reduction in hydroelectric production.

Keywords: Hydroelectric energy, hydro-climatic variability, Sassandra River, Buyo Dam, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

En Afrique, presque 600 millions de la population sont exclus de tout service énergétique Birol (2011). Le système électrique décentralisé reste donc un enjeu majeur pour le développement du continent (Guibert & Debreu, 2013). Selon Birol (2011), 70% de la population africaine n'ont pas accès à l'électricité malgré des sources d'énergie abondantes. Avec une consommation énergétique moyenne de 0,681 contre 1,9 tonne d'équivalent-pétrole par habitant en moyenne mondiale, l'Afrique subsaharienne se présente comme le plus défavorisé sur le plan de l'approvisionnement en énergie. La Côte d'Ivoire, à l'instar des pays africains, est soucieuse de la maîtrise de son énergie.

Ainsi, après la crise post-électorale de 2010-2011, la Côte d'Ivoire a repris le chemin de la croissance économique avec des taux établis entre 8 et 10% pour les années 2012 à 2017 (Bourgin, 2019). L'augmentation de la consommation électrique intérieure brute est évaluée entre 8 et 10% à court et moyen terme (Bourgin, 2019). Le pays compte sur son fort potentiel hydroélectrique pour augmenter sa capacité de production et ainsi assurer l'équilibre entre l'offre et une demande en forte augmentation.

Bien que la Côte d'Ivoire se veut optimiste sur la question de l'électricité, les questions de changement et de variabilité climatique deviennent de plus en plus préoccupantes. En effet, l'équilibre climatique mondial et les climats régionaux ont été rompu par les changements climatiques. Ils sont devenus de ce fait une menace quotidienne pour la planète en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel. D'après le GIEC (2007), ces changements pourraient conduire à la réduction de la production agricole, la détérioration de la sécurité alimentaire, l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau ainsi que l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires. Ces alertes dues aux conséquences de ces changements ont conduit la communauté scientifique à réfléchir sur des moyens de lutte. Ainsi, plusieurs conférences ont vu le jour dont celles de Stockholm en 1972, Rio en 1992, Kyoto en 1997, Afrique du Sud en 2002, Bali en décembre 2007, Copenhague en 2009 et Cancun en 2010.

Dans l'optique de déterminer les zones les plus touchées et les plus vulnérables, des études comme celle de Al Hamndou & Requier-Desjardins (2008) ont révélé que l'Afrique de l'Ouest est l'une des régions les plus vulnérables aux effets des changements climatiques alors que l'Afrique toute entière est moins responsable des émissions des gaz à effet de serre et émet moins de 2,5% des

émissions totales de CO₂. Cette vulnérabilité a poussé les chercheurs à mener plusieurs études. Dans ce cadre, plusieurs études ont montré que la variabilité des conditions climatiques en Afrique de l'Ouest et Centrale, et dans le haut bassin versant du fleuve Sassandra en particulier, n'est plus à démontrer. Elle a d'abord affecté le Nord puis progressivement s'est étendue vers la sud du bassin versant. D'autres études réalisées par Ouédraogo (2001), Badin (2004), Goula *et al.* (2006), Kouassi (2007), Adja (2009), Sorokoby (2013) et Yao (2015) à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest en général et de la Côte d'Ivoire en particulier ont montré qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée depuis les années 70. Cette tendance à la sécheresse s'est fait ressentir progressivement sur l'ensemble du pays. Elle a d'abord affecté le Nord, puis le Centre, et a finalement atteint le littoral ivoirien (Kouassi, 2007). Ces anomalies pluviométriques constatées depuis près de quatre décennies ont engendré d'énormes problèmes socio-économiques dans les régions nord et centre du pays. Mais en réalité, l'ensemble du pays présente une vulnérabilité importante aux déficits pluviométriques (Kouassi, 2007). La baisse de la pluviométrie a également eu des répercussions importantes aux plans agronomique et hydrologique. En hydrologie, cette situation a eu pour conséquence la baisse des débits des cours d'eau. En effet, les débits des grands fleuves ont connu des variations importantes par rapport à celles de la pluviométrie. Ainsi, on note une baisse des débits moyens de 20% à 60% depuis les années 70, réduisant significativement les superficies des principales zones humides naturelles (Madiodio *et al.*, 2004).

Aussi, un intérêt particulier est accordé à l'étude des changements climatiques en Côte d'Ivoire ainsi que leurs impacts sur les ressources en eau afin de garantir leur pérennité pour la pratique des activités anthropiques.

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo, notre bassin d'étude est une zone de transition entre différents climats. Chaque régime climatique agit sur les écoulements selon la variabilité des précipitations (intensité et nombre de jours de pluie). Pour la production d'énergie hydroélectrique, il a été construit les barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré. Les retenues d'eau de ces barrages sont directement impactées par la variabilité des régimes climatiques. Ainsi, une variabilité des précipitations même au niveau de chaque régime climatique pourraient significativement avoir des répercussions sur les lames d'eau écoulées et partant sur la production d'électricité. Ce bassin est une zone agricole occupée par des plantations de café, de cacao, etc... De ce fait, il n'est également pas en marge des impacts négatifs de la variabilité climatique. En effet, la déforestation accrue de ces dernières années a favorisé une mise à nu des terres au profit

de l'agriculture (Yao, 2015). Les questions relatives à la disponibilité et à la gestion de l'eau sont d'une importance capitale. La réponse à ces questions réside dans les mesures d'adaptation à mettre en œuvre dans les décennies à venir pour faire face aux conséquences des changements climatiques. Il est dès lors, primordial pour les décideurs et gestionnaires de faire la prévision du devenir des ressources en eau dans le bassin et d'anticiper sur sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude dont le thème est : **Analyse de la variabilité hydro-climatique et production de l'énergie hydraulique : Cas du barrage hydroélectrique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo (Côte d'Ivoire).**

Elle se propose de montrer l'impact des changements hydro-climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo sur la production de l'électricité du barrage.

De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser la variabilité hydro-climatique actuelle du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo ;
- modéliser la variabilité hydro-climatique future du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo à court et moyen terme (horizons 2030 et 2050) ;
- évaluer les impacts des sécheresses sur la production d'énergie du barrage hydroélectrique de Buyo.

Pour atteindre ces objectifs, le mémoire s'articule en trois (3) parties et structuré autour de sept (7) chapitres :

- la première partie avec deux chapitres porte sur les généralités de la zone d'étude ainsi que les notions liées à la thématique abordée ;
- la deuxième partie avec deux chapitres présente le matériel et les méthodes utilisés ;
- la troisième partie avec trois chapitres présente les résultats obtenus, leurs interprétations et la discussion qui en découle.

Une conclusion générale comportant des perspectives et des références d'étude achève ce mémoire.

PARTIE I : GÉNÉRALITÉS

Chapitre 1 : Généralités sur le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Introduction partielle

Ce chapitre est consacré à la description du cadre physique et environnemental du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo. Il présente d'abord la situation géographique de la zone d'étude, puis analyse les caractéristiques climatiques du bassin en distinguant les trois principaux régimes climatiques. La caractérisation physique du bassin est ensuite développée à travers l'étude du relief, du réseau hydrographique, des aménagements hydroélectriques, des activités socioéconomiques, ainsi que de la végétation, de la géologie et de la pédologie. Cette analyse constitue une base essentielle pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du barrage de Buyo et des impacts potentiels des variations climatiques sur ses ressources en eau.

1.1. Situation géographique

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée (Figure 1), connu sous le nom de Feroudougouba. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 75 000 km² à la mer (Girard & Sircoulon, 1968 ; Camus, 1969). La partie située sur le sol guinéen a une superficie d'environ 8 000 km². Cette étude est menée sur la partie ivoirienne du bassin versant qui a pour exutoire le barrage hydroélectrique de Buyo. La zone d'étude est comprise entre les longitudes Ouest de coordonnées 6°50' et 8°20' et les latitudes Nord de coordonnées 6°30' et 9°50', la superficie de cette zone est de 39 890 km². La superficie du bassin à Buyo tenant compte de la partie sur le sol Guinéen fait environ 46 250 km².

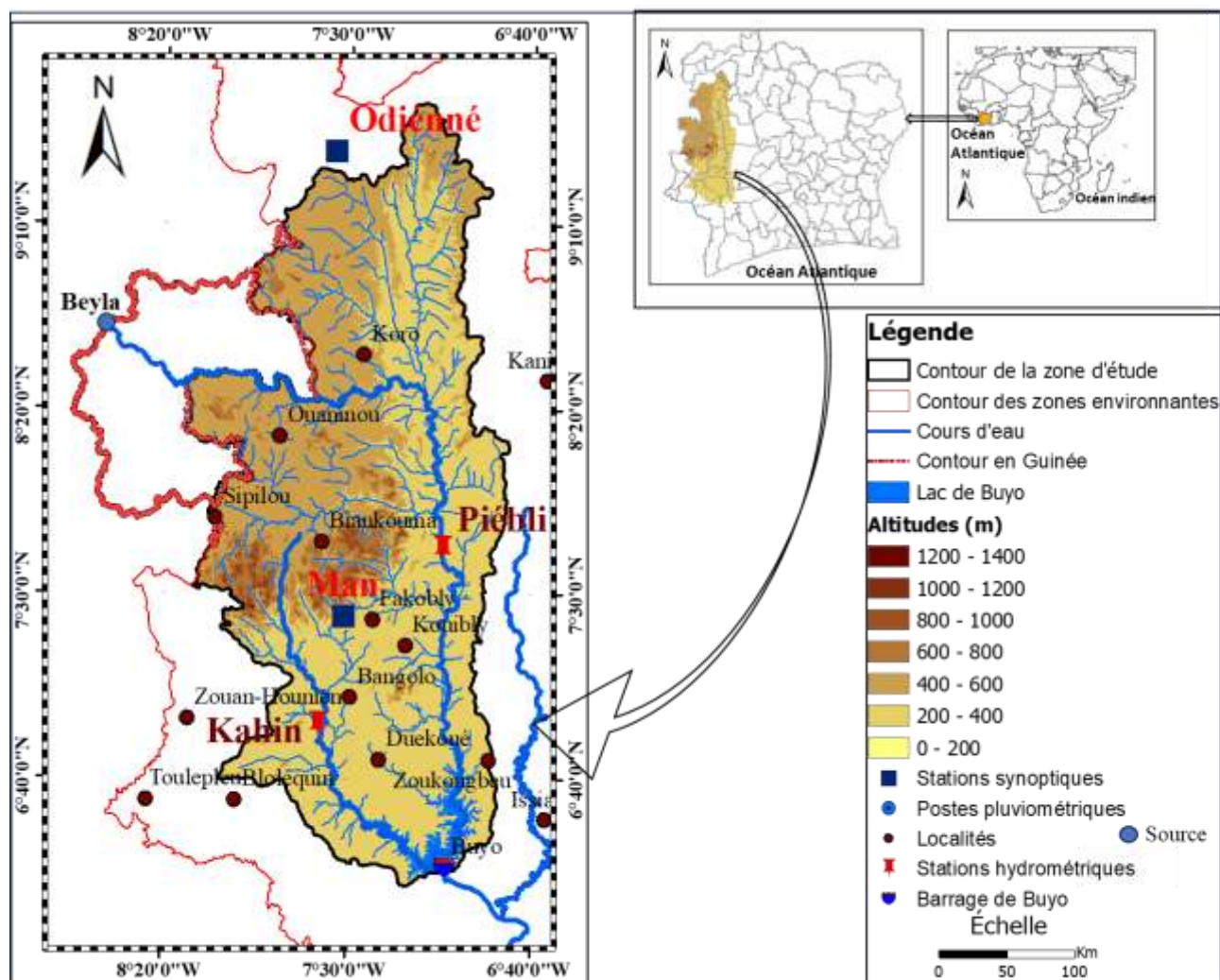


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.2. Caractéristiques climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo est sous l'influence de trois (3) régimes climatiques (Figure 2) (Bourgin & Chenet, 2015) :

- climat tropical de transition atténué (I) ;
- climat de montagne (II) ;
- climat équatorial de transition atténué (III).

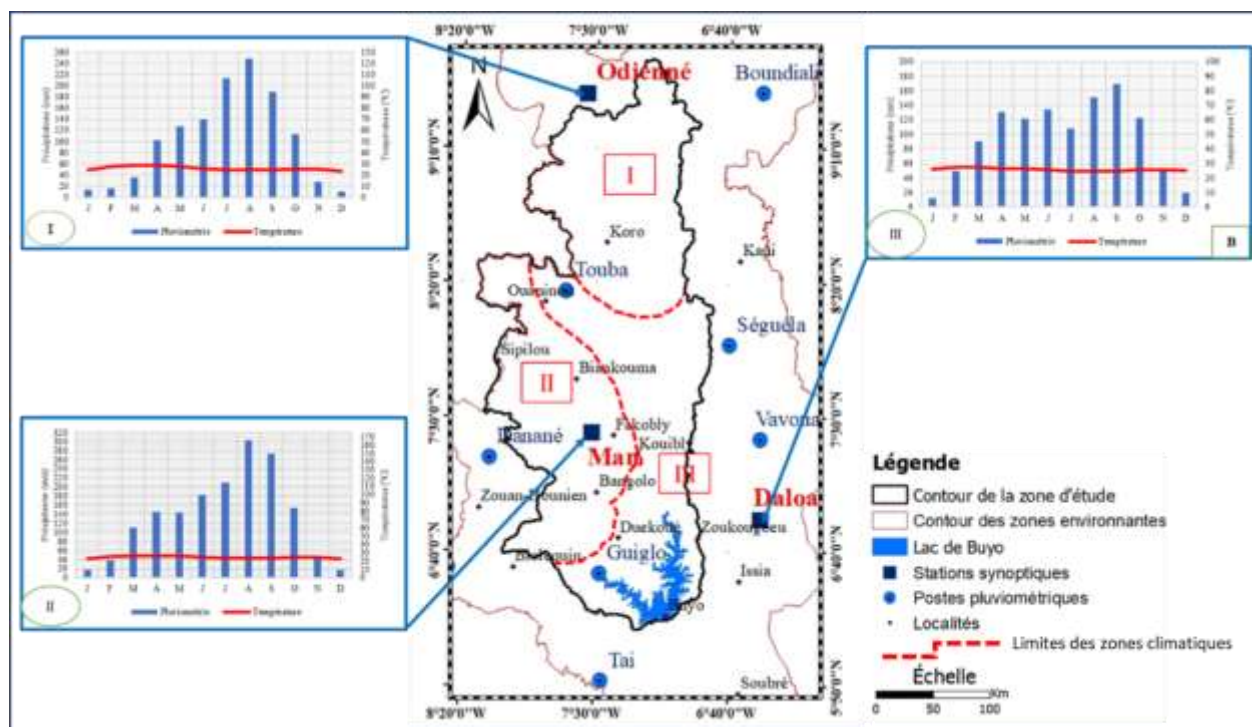


Figure 2 : Carte des zones climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

1.2.1. Zone climatique I : Climat tropical de transition atténuée

Le climat de cette zone est caractérisé par deux grandes saisons (Figure 2), une saison des pluies d'avril à octobre et une saison sèche de novembre à mars. Cette zone enregistre sur la période 1971-2020, une pluviométrie annuelle de 1702,1 mm et une température annuelle de 26,3°C (données de l'étude, 1971-2020).

1.2.2. Zone climatique II : Climat de montagne

Il est caractérisé par deux saisons (Figure 2), une saison des pluies assez longue (mars à octobre) et une saison sèche courte (novembre à février). Cette zone enregistre sur la période 1971-2020, une pluviométrie moyenne de 1211,7 mm et une température moyenne de 25,2°C (données de l'étude, 1971-2020).

1.2.3. Zone climatique III : Climat équatorial de transition atténuée

Ce climat est caractérisé par deux saisons, une grande saison des pluies (mars à octobre) et une petite saison sèche (novembre à février). Ce climat enregistre sur la période 1971-2020, une

pluviométrie moyenne de 1302,8 mm et une température moyenne de 26,5°C (données de l'étude, 1971-2020).

1.3. Caractérisation physique du bassin versant

1.3.1. Relief

Dans son ensemble, le relief de la zone d'étude est peu contrasté. Il est surtout caractérisé par une sorte de monotonie (Figure 3). Suivant cette uniformité apparente, trois grands types de reliefs (Konan, 2001) sont distingués des :

- plaines accentuées dans les régions Sud du bassin versant dont les altitudes varient de 97 à 200 m ;
- plateaux prolongent les plaines vers le Nord et s'en détachent progressivement. Les altitudes varient entre 200 et 500 m ;
- massifs montagneux, localisés à l'Ouest, principalement dans la région de Man avec des altitudes supérieures à 1 160 m. Dans cette région, des points remarquables tels que les monts Dan et Tonkpi qui culminent entre 1 100 et 1 180 m sont très remarquables. Au Centre et au Sud du bassin versant, la majorité des altitudes est inférieure à 365 m.

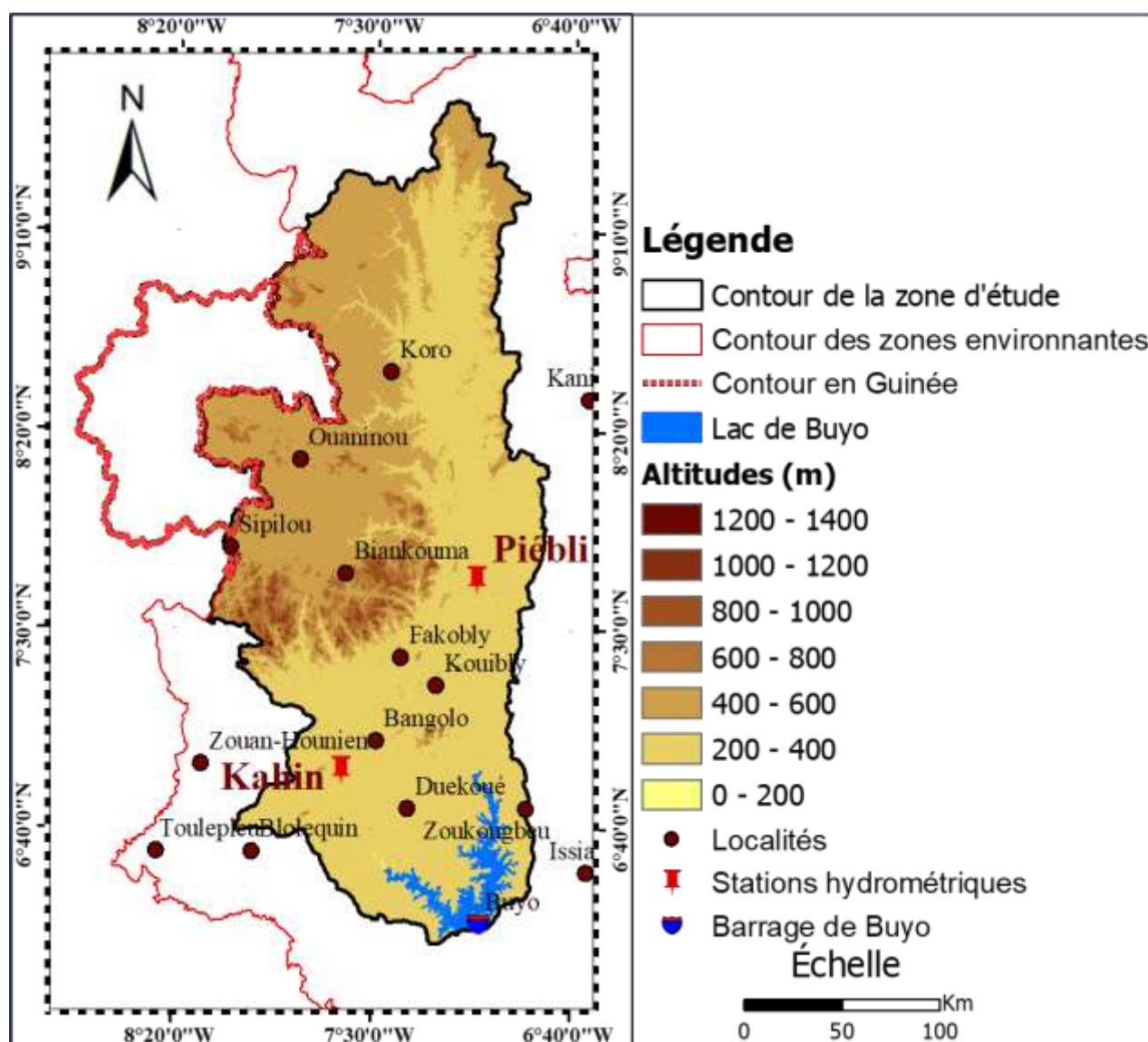


Figure 3 : Carte du relief du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

1.3.2. Réseau hydrographique

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée, connu sous le nom de Féroudougouba (Girard & Sircoulon, 1968 ; Camus, 1969) (Figure 4). La partie du bassin versant du fleuve Sassandra sur le territoire ivoirien se limitant à Buyo, couvre une superficie d'à peu près 39 890 km². Long de 442 km avec un débit estimé à 350 m³/s, le fleuve Sassandra reçoit deux affluents importants en rive droite : le Bafing (280 km) et le N'Zo (255 km). Les premiers affluents reçus sont en rive gauche : le Boa (180 km) et le Tiemba (182 km). En rive droite, le fleuve Sassandra reçoit comme premier affluent le Bafing. Après le confluent du Bafing, le lit du

Sassandra est parsemé d'îlots et présente de nombreux méandres jusqu'à la localité de Guessabo. Au-delà de cette localité, le Sassandra reçoit, en rive droite, le N'Zo. Ensuite des rapides coupent le lit du Sassandra : Bale, Broudé, Barakué, Poutopotou, Bola. Puis il reçoit, en rive gauche, la Lobo qui est le dernier affluent avant la localité de Soubré (Camus, 1969 ; Girard *et al.*, 1970).

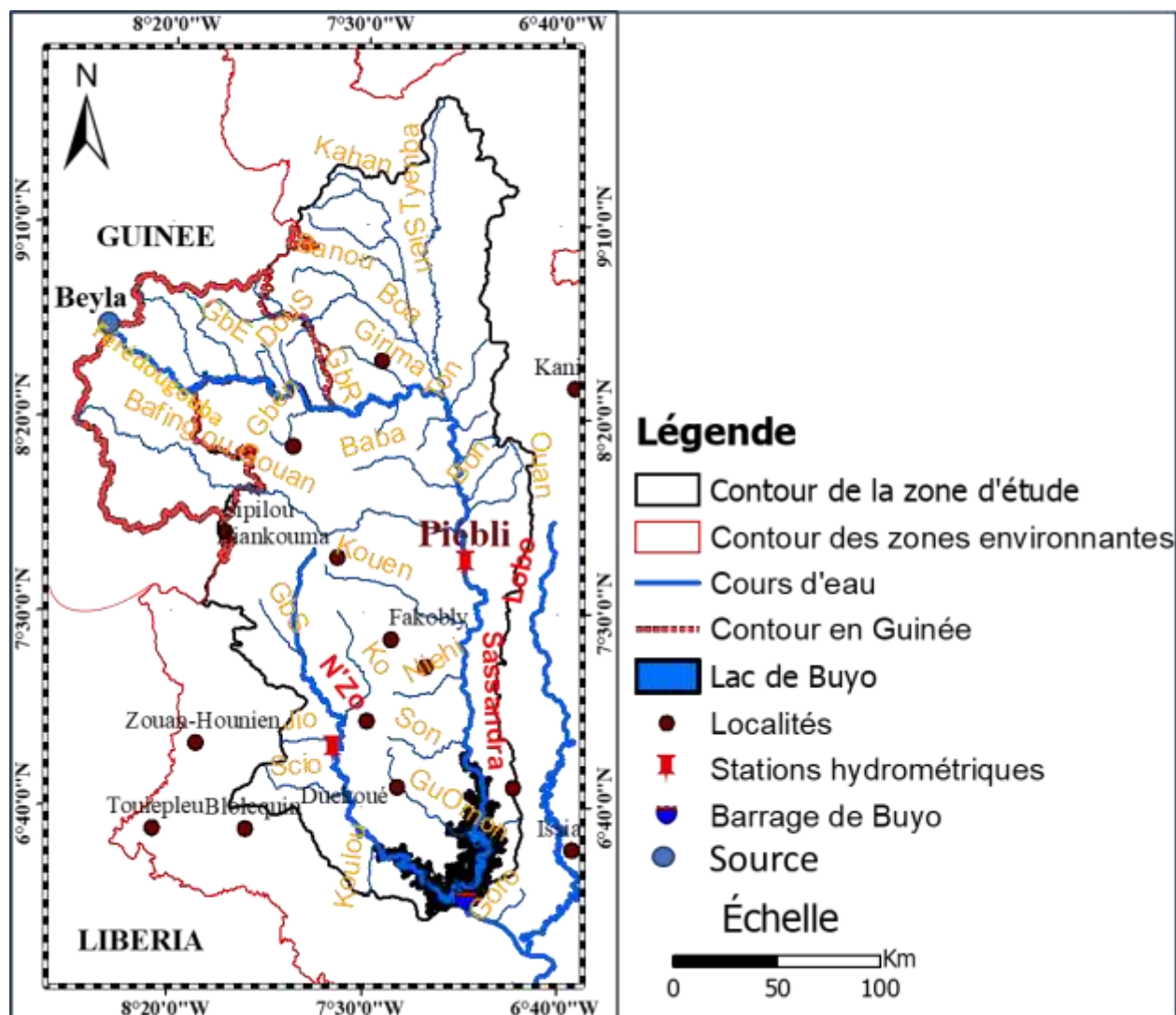


Figure 4 : Carte du réseau hydrographique du fleuve Sassandra à Buyo

1.3.3. Aménagement hydroélectrique du bassin versant du fleuve Sassandra

L'aménagement hydroélectrique du bassin versant du fleuve Sassandra a commencé au début des années 1977 avec la construction du barrage-réservoir de Buyo à vocation énergétique.

Le barrage de Buyo (Figure 5) porte le nom du village de Buyo, situé dans la Sous-préfecture de Buyo, au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Il a été construit à la confluence du fleuve Sassandra et de l'un de ses principaux affluents, le N'Zo. Il a une longueur de crête de 6,4 km et une hauteur de

36,1 m. La construction du barrage de Buyo a été réalisée dans le cadre de l'Autorité pour l'Aménagement de la Région du Sud-Ouest (ARSO), programme d'aménagement et de développement du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire réalisé de 1969 à 1980. Sous diverses modalités, l'ARSO avait pour objectifs majeurs de désenclaver la région du Sud-Ouest du pays autour de la nouvelle ville portuaire de San Pedro, de mettre en valeur les potentialités du sol et du sous-sol et d'initier le peuplement du vide démographique de la région. C'est dans ce contexte que le barrage de Buyo est réalisé pour accompagner le processus de développement régional et participer à la politique d'indépendance énergétique de la Côte d'Ivoire (Ancey & Pescay, 1984). La construction du barrage de Buyo commence en janvier 1977 et prend fin en mars 1980. Sa mise en fonction a généré un lac artificiel de 900 km² contenant environ 8,4 milliards de m³ d'eau (Mel, 2003).

Il est doté d'une retenue d'un volume total de 8,4 milliards de m³, dont 6,5 milliards de m³ de capacité utile, soit environ la moitié de l'apport brut moyen annuel. L'usine hydroélectrique située au pied de barrage est équipée de trois groupes Kaplan de puissance nominale 55 MW, soit une puissance totale installée de 165 MW. Le productible moyen annuel s'élève à 800 GWh/an (Bourgin, 2019).

L'aménagement du bassin s'est poursuivi avec la mise en service en novembre 2017 du barrage de Soubré (Figure 5) dans le cours inférieur du Sassandra. Il s'agit d'un aménagement au fil de l'eau doté d'une usine principale équipée de trois groupes Francis de puissance nominale 90 MW. Une minicentrale de capacité 5,3 MW est également installée en pied de barrage pour valoriser le débit réservé de 50 m³/s, lui-même dépourvu d'une capacité significative de stockage. L'aménagement de Soubré bénéficie de la régularisation saisonnière des débits du Sassandra effectuée à l'amont par le barrage-réservoir de Buyo, en d'autres termes, le fonctionnement du barrage de Soubré dépend des lâchés d'eau effectués en amont par le barrage de Buyo. Le productible moyen annuel attendu à Soubré est estimé à environ 1200 GWh/an (Bourgin, 2019).

Identifiés lors de l'inventaire de Électricité de France (EDF) en 1979, les sites qui suscitent ces dernières années des perspectives d'investissement sont situés en partie à l'amont de Buyo (Gao et Koulikoro sur la Bafing, Tayaboui sur le Sassandra) et en partie à l'aval de Soubré (Gribo-Popoli, Boutoubéré et Louga 1 et 2). Les travaux de construction du barrage de Gribo-Popoli ont commencé fin 2017 (Bourgin, 2019).

Ainsi, formant une cascade d'aménagements, ces projets interagissent entre eux (ouvrages existants et en construction). La retenue du barrage hydroélectrique de Buyo est située en amont des autres

barrages en construction situées en aval. Cette retenue possède une capacité assez importante pour stocker l'eau qui est par la suite redistribuée aux autres. Ces derniers, à l'image de la retenue de Soubré, fonctionneraient comme des barrages au type fil de l'eau. Les apports hydrologiques à ces sites sont exclusivement contrôlés par les débits relâchés par Buyo et en partie à la contribution naturelle du bassin versant intermédiaire entre Buyo et ceux-ci.

Il n'existe a priori pas de prélèvements ou de consommations nettes en eau dans le bassin susceptibles de peser significativement dans le bilan hydrologique (Bourgin, 2019).

Le tableau I présente les caractéristiques importantes des deux barrages de Soubré et Buyo.

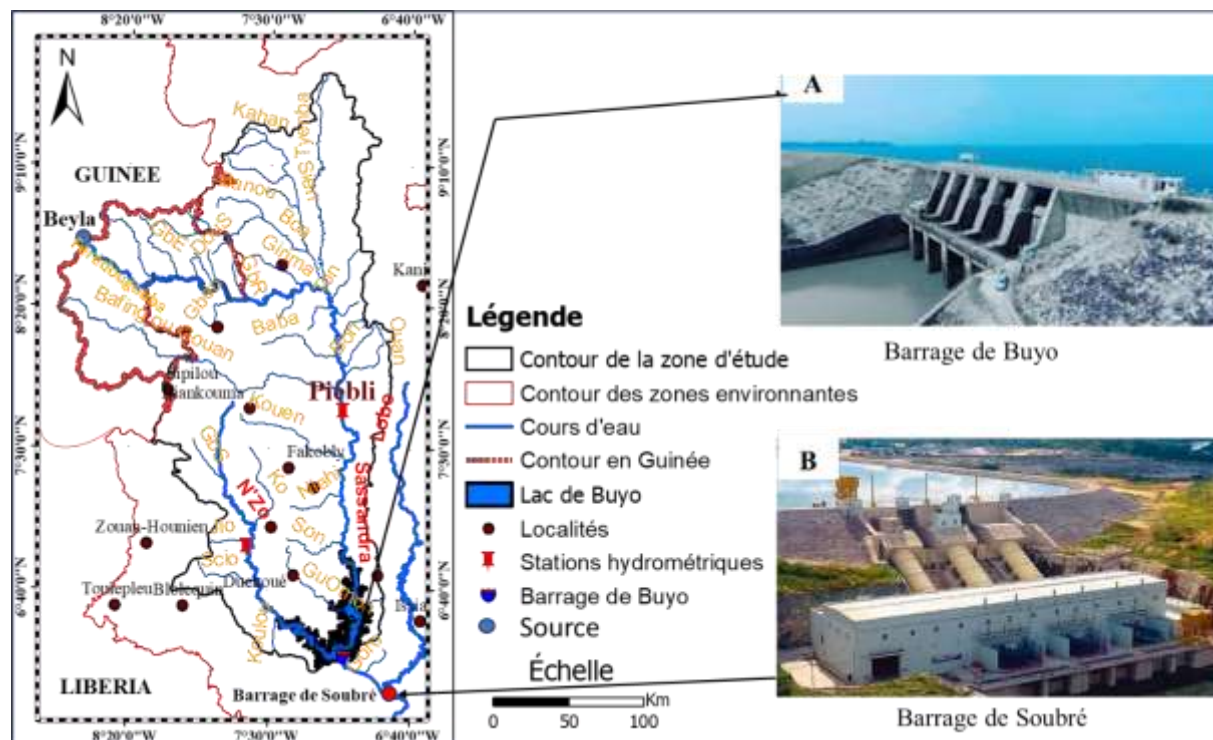


Figure 5 : Barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré

Tableau I : Caractéristiques des barrages de Buyo et de Soubré

Caractéristiques des barrages hydroélectriques	Buyo	Soubré
Fleuve	Sassandra	Sassandra
Superficie (km²)	39 890	54 670
Année de mise en service	1980	2017
Surface de la retenue (km²)	832	17,5
Puissance totale (MW)	165	275
Nombre de groupes	3	4
Débit d'équipement (m³/s)	555	714
Hauteur de chute brute nominale (m)	36,1	43
Apport moyen (m³)	8 300 000 000	14 000 000 000

1.3.4. Activités socioéconomiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Les activités économiques sur le bassin du Sassandra sont assez diversifiées. Cependant l'agriculture reste la principale activité génératrice de revenus. Elle occupe la majorité des populations. La dynamique agricole est basée essentiellement sur les cultures de rente pérennes (café, cacao, hévéa, palmier à huile), les cultures vivrières et les maraîchers. Le système agricole au départ extensif, évolue aujourd'hui vers une agriculture beaucoup plus intensive du fait de la raréfaction des terres cultivables. Dans sa partie Nord, l'élevage demeure l'activité principale et secondaire sur tout le bassin versant. L'approvisionnement des populations est assuré par les systèmes d'adduction d'eau de la SODECI (Société de distribution d'eau de Côte d'Ivoire) pour les grands centres urbains et par le système d'hydraulique villageoise et d'hydraulique villageoise améliorée pour les autres localités. Ces principales activités anthropiques favorisent le processus d'érosion des sols à travers (N'Go, 2017) :

- le labour des pâturages et la destruction de la couverture végétale ;
- les différents procédés agricoles sur le sol ;
- le pâturage et surpâturage particulièrement dans les zones à pentes fortes ;
- l'exploitation forestière et le déboisement ;
- les carrières de graviers, de sables et d'argiles ;
- les feux de brousse.

Ces facteurs concourent à l'exposition des sols aux facteurs climatiques et à la destruction de leur structure originelle.

1.3.5. Végétation

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo est couvert de deux types de végétation (Figure 6). Il s'agit d'un paysage forestier et d'un paysage de savane. Toutefois, la classification des régions agro-climatiques permet de faire les distinctions suivantes. Le Bas Sassandra forestier occupe les massifs forestiers du Sud auxquels se rattache le massif montagneux de Man (Jourda, 2009). La végétation est limitée au Nord par la ligne Guitry-Soubre-Duékoué qui remonte le long du fleuve Sassandra à l'Ouest jusqu'au niveau du massif de Man. La végétation est dominée par la forêt autrefois dense humide sempervirente (Guillaumet & Adjanohoun, 1969). Cette végétation est aujourd'hui clairsemée du fait des activités anthropiques et des perturbations climatiques.

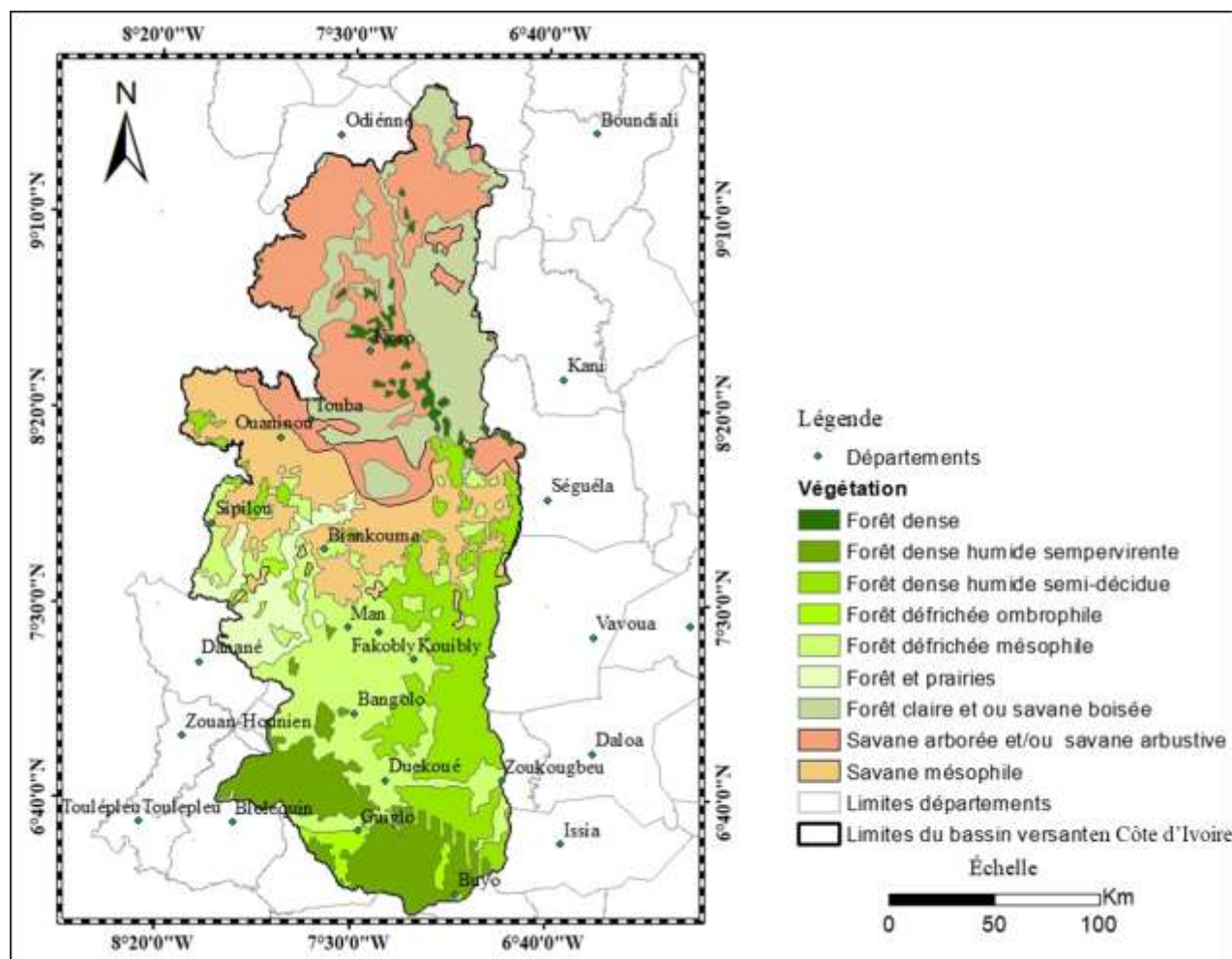


Figure 6 : Carte de végétation du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

1.3.6. Géologie et pédologie

L'ensemble du bassin versant du Sassandra est constitué de formations du précambrien inférieur et moyen (Figure 7) (N'Go, 2017). Le précambrien inférieur s'aperçoit à travers des gneiss, des migmatites et des mylonites au Sud d'Odienné et un peu à l'Ouest de Séguéla. Le précambrien moyen occupe les 95 % du socle du bassin du Sassandra. Il est marqué par des granites et des migmatites du Nord au Sud sur l'ensemble du bassin. Les migmatites, les formations de métamorphismes intenses et les formations stratigraphiques sont localisées dans les régions de Guiglo et Soubré. Il faut cependant noter la présence de quelques époutements de dolérites et basaltes du primaire dans la région de Touba et au Sud-est d'Odienné (Konan, 2001). Selon Kadio (1989), le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré est dominé par les sols ferralitiques plus ou moins saturés et indurés. Les sols ferralitiques sur roches précambriens et sur sédiments tertiaires

y sont rencontrés. Dans ce même bassin, on y rencontre également des sols ferralitiques montagnards et des sols ferrugineux.

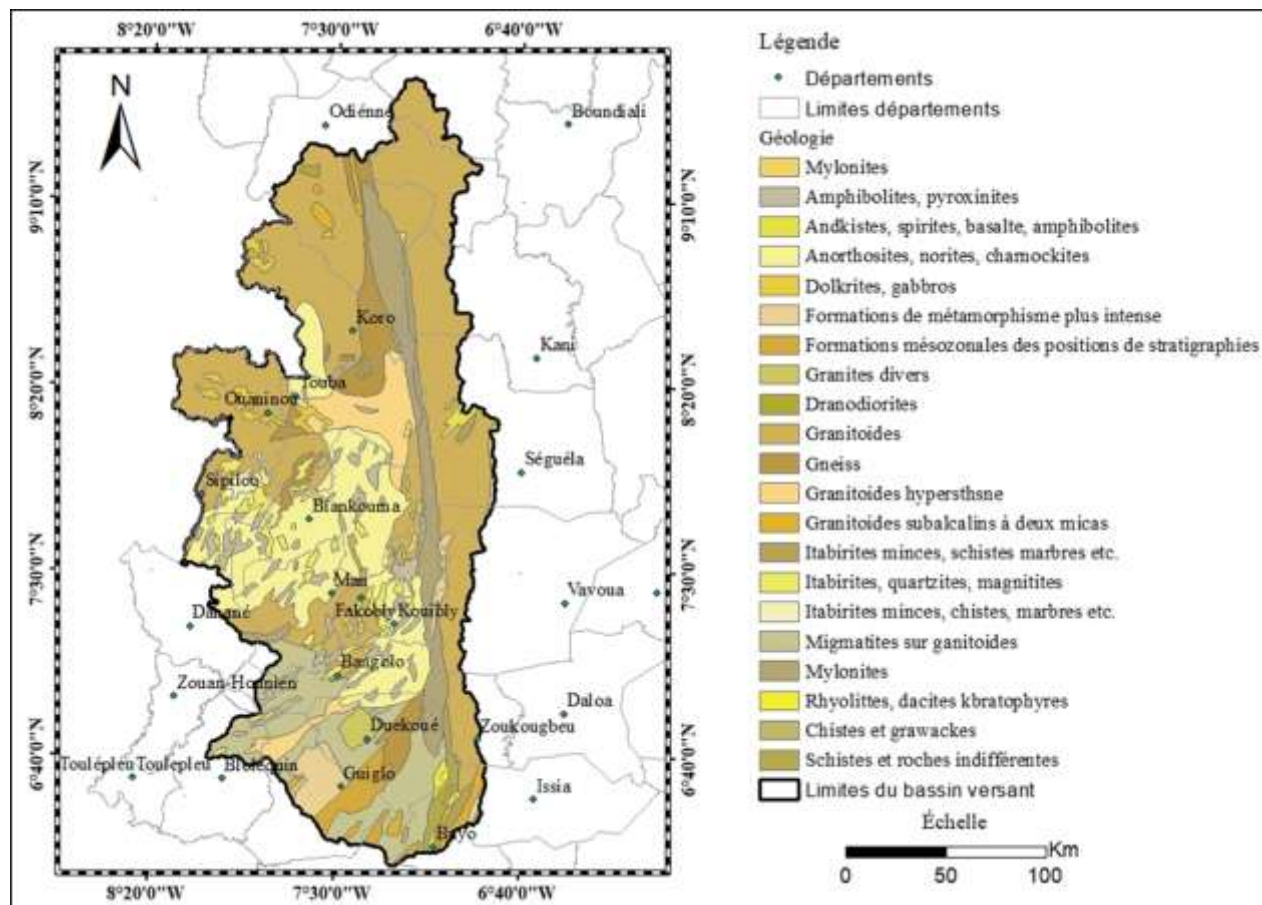


Figure 7 : Carte géologique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Conclusion partielle

Le bassin versant du fleuve Sassandra au barrage hydroélectrique de Buyo, la zone d'étude est du point de vue morphologique, relativement peu accidentée dans l'ensemble. Le relief est généralement monotone à l'exception de la région de l'Ouest montagneux, qui présente des élévations importantes. Le réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Sassandra est assez dense. Trois régimes climatiques dominent sur le bassin versant du fleuve Sassandra. Il s'agit des régimes : équatorial de transition atténuée, de montagne et tropical de transition atténuée. Le bassin versant est couvert par deux grands types de végétation : un paysage de savane et un paysage forestier avec une végétation spécifique. Sur le plan géologie, le bassin est constitué de formations du précambrien inférieur et moyen.

Après avoir présenté les généralités sur la zone d'étude, le travail aborde le deuxième chapitre portant sur les généralités de la variabilité et du changement climatique, d'une part, et la modélisation climatique et hydrologique, d'autre part.

Chapitre 2 : Variabilité et changement climatique, modélisation climatique et modélisation hydrologique, barrage et fonctionnement

Introduction partielle

Ce chapitre présente le cadre conceptuel et méthodologique de l'étude. Il aborde la sécheresse, le changement climatique et la variabilité pluviométrique, en considérant notamment l'influence du phénomène ENSO. Il décrit ensuite les méthodes d'interpolation, ainsi que les approches de modélisation climatique et hydrologique utilisées pour analyser la réponse du bassin du Sassandra aux évolutions climatiques. Enfin, il rappelle le principe de fonctionnement des barrages hydroélectriques, dont la performance dépend directement de la disponibilité de la ressource en eau.

2.1. Sécheresse, variabilité et changement climatique

Il existe une différence fondamentale entre la variabilité climatique, le changement climatique et la sécheresse. Dans cette partie, des éléments de réponses sont donnés pour permettre une distinction de ces notions importantes.

2.1.1. Sécheresse

Il n'existe aucune définition de la sécheresse qui soit unanimement acceptée. Les définitions retrouvées dans la littérature diffèrent selon la région étudiée, les besoins ou les perspectives du champ de travail dont elles proviennent.

Selon Rudloff (2020), la sécheresse peut être définie comme étant une période prolongée de précipitations insuffisantes, pendant une ou plusieurs saisons ou même des années, causant un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays. Le bureau météorologique américain définit la sécheresse comme un manque de pluie assez important et prolongé qui pourrait avoir des conséquences néfastes sur la vie végétale et animale d'un lieu et épuiser les réserves d'eau, à la fois pour les besoins domestiques et pour le fonctionnement des centrales électriques, en particulier dans les régions où les précipitations suffisent normalement à ces fins (Wilhite & Glantz, 1985).

Selon les définitions opérationnelles d'après Wilhite & Glantz (1985), il existe quatre grands types de sécheresse :

- **Sécheresse météorologique**

La sécheresse météorologique est basée sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche (Djouane, 2015). Elle se caractérise par l'absence des pluies dans une région donnée sur une période de temps déterminée. Elle est souvent définie, pour une zone caractérisée par des pluies saisonnières, par la mesure de la déviation des précipitations cumulées sur une période donnée par rapport à la normale de cette période calculée sur au moins 30 ans.

Dans les régions où la pluie est reçue toute l'année, la définition de la sécheresse est basée sur le nombre de jours où les précipitations sont inférieures à un niveau critique donné (Rudloff, 2020).

- **Sécheresse hydrologique**

La sécheresse hydrologique est associée aux effets des périodes de précipitations, les chutes de neige sur les réserves d'eau de surface ou souterraines (la sécheresse météorologique, si elle est prolongée entraîne une sécheresse hydrologique) (Wilhite & Glantz, 1985). La fréquence et la gravité de la sécheresse hydrologique sont souvent définies à l'échelle d'un bassin versant ou bassin hydrographique. Bien que toutes les sécheresses aient pour origine un déficit de précipitations, les hydrologues sont davantage préoccupés par la façon dont ce déficit se répercute sur le système hydrologique. Les sécheresses hydrologiques sont généralement en décalage ou en retard par rapport aux sécheresses météorologiques et agricoles (Wilhite & Glantz, 1985). Il faut plus de temps pour que les précipitations insuffisantes apparaissent dans les composants du système hydrologique tels que l'humidité du sol, le débit des cours d'eau et les recharges des nappes phréatiques avec un épuisement marqué des eaux de surface et un assèchement des masses d'eaux intérieures telles que les lacs, les barrages, etc. Par conséquent, ces impacts sont déphasés de ceux des autres secteurs économiques (Wilhite & Glantz, 1985).

- **Sécheresse agricole**

La sécheresse agricole associe diverses caractéristiques de la sécheresse météorologique (ou hydrologique) à des incidences sur l'agriculture notamment les pénuries de précipitations, les différences entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, les déficits en eau du sol, la réduction des niveaux d'eau souterraine ou de réservoir, etc (Wilhite & Glantz, 1985). La demande en eau des plantes dépend des conditions météorologiques, des caractéristiques biologiques de la plante, de son stade de croissance et des propriétés physiques et biologiques du sol. Une bonne définition

de la sécheresse agricole devrait pouvoir prendre en compte la sensibilité variable des cultures au cours des différents stades de développement des cultures, de la levée à la maturité. Une humidité insuffisante de la couche arable lors de la plantation peut nuire à la germination, entraînant une faible population de plantes par hectare et une réduction du rendement final (Wilhite & Glantz, 1985).

- **Sécheresse socio-économique**

Elle apparaît lorsque l'insuffisance en eau commence à affecter les êtres vivants. Elle associe les biens économiques et les éléments des sécheresses météorologique, agricole et hydrologique. Ce type de définition diffère des autres par le fait que cette sécheresse est basée sur le processus de l'offre et de la demande (Wilhite & Glantz, 1985). La sécheresse socio-économique se manifeste lorsque l'offre d'un bien économique ou d'une denrée (forage, énergie hydro-électrique...) ne peut plus satisfaire la demande de ce produit et que la cause de ce déficit est liée au climat, et singulièrement au manque de précipitations (Rudloff, 2020). Dans la plupart des cas, la demande de biens économiques augmente en raison de l'augmentation de la population et de la consommation par habitant. L'offre peut également augmenter en raison de l'amélioration de l'efficacité de la production et de la technologie utilisée (Wilhite & Glantz, 1985).

2.1.2. Climat et changement climatique

2.1.2.1. Climat

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat se définit comme étant la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère. Le climat est aussi la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. L'étude du climat est la climatologie. Elle se distingue de la météorologie qui désigne l'étude du temps dans l'atmosphère à court terme et dans des zones ponctuelles.

La caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent, etc. La récurrence des paramètres est également prise en compte ainsi que les phénomènes exceptionnels.

Ces analyses permettent de classer les climats des différentes régions du monde selon leurs caractéristiques principales.

Selon le GIEC (2007), le climat a fortement varié au cours de l'histoire de la Terre sous l'influence d'une pluralité de phénomènes astronomiques, géologiques, etc., et plus récemment sous l'effet des activités humaines (réchauffement climatique). De ce fait, le climat est caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes. La détermination du climat repose sur une analyse du temps qu'il a fait chaque jour durant une longue période, en général trente années consécutives (Kouakou, 2011). Selon Rakotondrabe (2007), pour déterminer le climat, il faut se baser sur les observations météorologiques pour caractériser les états de l'atmosphère (la température de l'air, la pluie, la durée de l'insolation, la direction du vent, etc.).

2.1.2.2. Changement climatique

La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) définit la notion de changement climatique comme un changement dû directement ou indirectement à l'activité humaine. Pour le GIEC, le changement climatique se réfère à un changement statistiquement significatif dans l'état moyen du climat ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste sur une longue période de temps (décennies ou plus). Le changement climatique peut être dû aux processus naturels internes ou à des forçages exogènes ou à des activités anthropiques persistantes dans l'atmosphère ou dans les usages du sol (Kouakou, 2011).

Selon Harris *et al.* (2017), les combustibles fossiles, à savoir le charbon, le pétrole et le gaz sont de loin les plus grands contributeurs au changement climatique mondial. Ils sont responsables de plus de 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et de près de 90 % de toutes les émissions de dioxyde de carbone.

Les émissions de gaz à effet de serre enveloppant la terre, retiennent la chaleur du soleil. Cela entraîne un réchauffement climatique et partant un changement climatique. En effet, le monde se réchauffe désormais à une vitesse jamais observée dans l'histoire documentée (0,27°C/décennie). Au fil du temps, les températures plus élevées entraînent des variations climatiques et déstabilisent l'équilibre habituel de la nature. Cette situation pose de nombreux risques pour les êtres humains et toute autre forme de vie sur Terre. L'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre se traduit par une hausse de la température à la surface du globe. La période 2011-2020 est la décennie la plus chaude jamais observée. Depuis les années 1980, chaque décennie successivement présente des températures moyennes plus élevées que la précédente (GIEC, 2007).

2.1.2.3. Causes du changement climatique

Selon Yeo (2017), le climat de la planète dépend de nombreux facteurs, principalement de la quantité d'énergie provenant du soleil, mais aussi de facteurs tels que la teneur en gaz à effet de serre (GES) et en aérosols de l'atmosphère ou les propriétés de la surface de la Terre. Ces facteurs conditionnent la quantité d'énergie solaire qui sera absorbée ou réfléchi dans l'espace (GIEC, 2007). Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) se sont accrues de façon notable depuis le début de la révolution industrielle (GIEC, 2007). Ces augmentations sont principalement dues aux activités humaines, comme l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.), les changements d'affectation des terres et l'agriculture. Ces facteurs sont dus à la production d'énergie (la production d'électricité et de chaleur par la combustion de combustibles fossiles est à l'origine d'une grande partie des émissions mondiales), la fabrication de produits (génération des émissions par les industries manufacturées, l'exploitation minière), l'abattage de forêts (l'abattage de forêts pour l'agriculture, le pâturage ou d'autres raisons, entraîne des émissions), l'utilisation de moyens de transport (le transport tel que les voitures, les navires et les avions, alimentés par les combustibles fossiles constituent une source importante d'émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone).

2.1.2.4. Impacts sectoriels du changement climatique en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, les secteurs prioritaires impactés sont l'agriculture, les ressources en eau, l'énergie et les ressources côtières.

- **Agriculture**

La modification des paramètres climatiques ces dernières décennies a occasionné une inadéquation entre la saison des pluies et les calendriers culturels. Des études menées par Djè (2014) montrent que la saison des pluies s'est raccourcie en moyenne de 10 à 27 jours sur le littoral. Selon ces études, les retards de démarrage de la saison varient d'une à deux semaines selon la localité. Selon la Banque Mondiale (2023), la culture du cacao qui représente un tiers des exportations du pays et qui fournit un revenu à plus de 5 millions de personnes, est remise en cause par la hausse des températures qui devrait réduire la fertilité des terres dans les régions agricoles. Aussi, est-il indiqué qu'en Côte d'Ivoire, les perturbations pluviométriques ont eu un impact significatif sur la production du cacao avec une chute du rendement de plus de 20 % pendant les épisodes El Niño

(Djè, 2014). On note également que les changements se traduisent aussi par la perte des récoltes liée aux aléas tels que les inondations, la sécheresse, les feux de brousse qui sont d'origine climatique. Ces perturbations climatiques mettent en mal la sécurité alimentaire.

- **Ressources en eau**

En Côte d'Ivoire, la variabilité climatique du fait de ses effets sur les températures et la pluviométrie, contribue à accroître la vulnérabilité relative des ressources en eau malgré les nombreux outils de gestion mis en place. En effet, il est observé des déficits hydrologiques, témoins des déficits pluviométriques, pouvant s'expliquer par une variation de la circulation atmosphérique (Badin, 2004).

Les résultats de plusieurs études sur l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau montrent qu'au niveau des écoulements des grands cours d'eau, les variations sont à la baisse. À l'horizon 2080-2099, les écoulements en Afrique de l'Ouest, pourraient baisser jusqu'à 50 % (Sheffield & Wood, 2008).

En Côte d'Ivoire, la baisse des écoulements peut atteindre la barre des 20 %. Les études réalisées par Badin (2004) sur l'impact des changements climatiques sur les écoulements du bassin versant du fleuve Sassandra pour les décennies à venir ont montré que le débit des rivières et la disponibilité en eau augmenteraient de 10% à 13% durant la première moitié du 21ème siècle (horizon 2050) avant de diminuer à l'horizon 2080 par rapport à la période de référence 1971-1995. Les études de Goula *et al.* (2006) ont montré que le régime des écoulements à l'horizon 2075 du fleuve Bandama à Marabadiassa pourrait diminuer de 22 % et ceux du fleuve Sassandra à Piébli et à Kahin pourraient baisser respectivement de 8,4 % et de 6,9 %. Kouakou *et al.* (2014) ont montré sur le bassin versant du fleuve Comoé que les précipitations annuelles pourraient diminuer de 3 % sur la période 2031-2040 et de 7 % sur la période 2091-2100. Sur ces périodes futures, les températures annuelles pourraient augmenter respectivement de 0,6°C et de 3,6°C. Les écoulements pourraient baisser de 13,8 % à 19,2 % sur la période 2031-2040 et augmenter de 37,3% à 41,5% sur la période 2091-2100. Les résultats des études menées par Soro *et al.* (2017) sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bandama prévoient une augmentation de la température de +1,2°C et +3°C selon les régions du bassin.

Des études récentes réalisées sur le bassin versant du Sassandra par Coulibaly *et al.* (2018) ont montré une réduction du débit annuel. Ainsi, avec le scénario RCP 4.5, les valeurs observées passent de 1,2% en 2030 à 2,3% en 2070 et de 1,2 % en 2030 à 2,1 % en 2090. Le scénario RCP

8.5 prévoit une variation de 4,2 à 7,9 % aux horizons 2030 et 2090. Yao (2015) a montré sur le bassin versant de la rivière Lobo à Loboville que les températures pourraient augmenter de $+0,6^{\circ}\text{C}$ à $+1,5^{\circ}\text{C}$ à l'horizon 2035-2050 et de $2,9^{\circ}\text{C}$ et $4,7^{\circ}\text{C}$ à l'horizon 2085-2100. Les précipitations ont, quant à elles, un caractère plus variable que les températures. En effet, la tendance est soit à la hausse (horizon 2010-2025), soit à la baisse (horizons 2035-2050 et 2085-2100). En définitive, les changements climatiques ont un impact réel sur les ressources naturelles et en particulier sur les ressources en eau superficielle.

- **Érosion côtière**

L'érosion côtière est un phénomène naturel accentué par la variation des paramètres climatiques et certaines perturbations d'ordre socio-économique, occasionnées par les populations elles-mêmes. Cette situation laisse donc apparaître plusieurs menaces sur le littoral ivoirien. La hausse du niveau des océans et l'élévation de la température ont des impacts sur la viabilité des ports ivoiriens, l'aménagement des plages, les habitations en bordure des cotes maritimes, etc. (Djè, 2014). La montée du niveau de l'océan Atlantique est aussi préoccupante. Les plaines côtières abritent près de 7,5 millions d'habitants, soit 30 % de la populations ivoirienne, et regroupent environ 80 % des activités économiques du pays. Actuellement, plus des deux tiers de ce littoral est affecté par le phénomène d'érosion côtière (Banque Mondiale, 2023).

La perte des plages et des dunes qui fournissent une protection naturelle contre les inondations, aggrave les submersions marines qui envahissent les villes et les villages durant les fortes tempêtes. C'est également une menace pour l'économie du pays, de par son impact potentiel sur les installations industrielles et les infrastructures de premier plan, comme la Société Ivoirienne de Raffinage (SIR), l'Aéroport international d'Abidjan, les Ports d'Abidjan et de San Pedro, les routes côtières, les plantations industrielles, ainsi que d'importantes installations hôtelières à Abidjan, Grand-Bassam, Assainie et San-Pedro. Une étude de cas sur la zone de Port-Bouët a estimé le coût de l'érosion et de la submersion marine pour la seule année 2015 à 1,4 milliard de franc CFA.

2.1.3. Variabilité climatique

Selon l'organisation météorologique mondiale, la variabilité climatique est la variation naturelle du climat, au cours d'une même année et d'une année à l'autre. C'est l'amplitude de l'écart à la moyenne climatique et représente la variation naturelle intra et interannuelle du climat. Plus généralement, c'est l'ampleur des fluctuations du climat à différentes échelles de temps et d'espace

(Harris *et al.*, 2017). Elle se manifeste en particulier, par une modification du régime des précipitations et par une diminution des hauteurs annuelles (Brou *et al.*, 2005). Elle décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles des paramètres climatiques (précipitation, température, écoulement de surface...) par rapport aux valeurs moyennes temporelles de référence (Servat *et al.*, 1999).

La variabilité climatique dont les causes sont difficiles à cerner, peut se manifester par de longues périodes de sécheresse avec pour conséquences des effets négatifs sur le cycle hydrologique, l'environnement et les activités socio-économiques (Goula *et al.*, 2006). Une tendance à la baisse de la pluviométrie a été observée en Afrique de l'ouest à partir de la fin des années 60 et au début des années 70 jusqu'au début de la décennie 90 (Hubert *et al.*, 1989 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1999). Le déficit des apports a été estimé à 16% pour l'Afrique tropicale durant la décennie 80 contre 7% au cours de la décennie 70. Au niveau de l'Afrique soudano-sahélienne, cette estimation est de l'ordre de 27% et 13% respectivement pour les décennies 80 et 70 (Bricquet *et al.*, 1997).

2.1.4. Changements climatiques et variabilité pluviométrique

De façon générale, l'équilibre des écosystèmes dépend en grande partie de la dynamique hydro climatique. Cette dynamique détermine la nature et le développement des espèces qui y vivent. Sous l'effet de la variabilité du climat, la végétation naturelle est affectée dans sa composition floristique et dans sa structure, ainsi que dans l'adaptation morphologique et écophysologique des espèces qui la composent (Le Houérou, 1992). La variabilité climatique se manifeste par la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles des principaux paramètres climatiques (Ouarda *et al.*, 1999). De nombreuses conséquences socio-économiques résultant des manifestations climatiques sont de ce fait perceptibles. Ces manifestations sont la diminution sans cesse de la couverture spatiale et le cubage des grands glaciers depuis quelques décennies. La sécheresse a touché les deux bandes tropicales de la planète (surtout les régions sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest) depuis les années 70 (Sircoulon, 1976). La récurrence des phénomènes El Niño et l'augmentation de la température de la planète de 0,5°C depuis la moitié du siècle dernier (Cantat, 1995) sont autant de manifestations. L'étude de variables relatives au cycle de l'eau permet en effet d'appréhender certains aspects de l'évolution du climat. Ces variables peuvent être les débits des rivières, les niveaux des lacs, les précipitations, les températures de l'air et de l'eau, les dates de

rupture de couvert et le niveau des eaux souterraines. De toutes ces variables, la pluviométrie constitue l'élément le plus accessible. Sa mesure peut se faire tant localement que régionalement. De la mesure des données de pluie, plusieurs variables peuvent être déduites et étudiées. Au nombre de ces variables, il y a la pluviométrie annuelle (Hubert & Carbonnel, 1987), le nombre de jours de pluie (Servat *et al.*, 1999; Sighomnou, 2004), les pluies extrêmes, etc. L'étude de ces paramètres a permis de détecter d'éventuels signes de changement climatique en Afrique comme dans le reste du monde. Particulièrement en Afrique sahélienne et non sahélienne les auteurs (Paturel *et al.*, 1995 ; Ouédraogo *et al.*, 1998; Servat *et al.*, 1999; Sighomnou, 2004 ; Brou, 2005; Goula *et al.*, 2006) ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui a perduré jusqu'à la fin des années 1990. Ces travaux ont montré une diminution de la pluviométrie annuelle et une diminution du nombre de jours de pluie et une diminution de l'occurrence des fortes intensités de pluie (Hountondji *et al.*, 2011).

2.1.5. Phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation)

Le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation) est un cycle climatique complexe qui se produit (prend naissance) à l'échelle interannuelle dans l'océan pacifique équatorial. Il implique des variations périodiques des températures de surface de la mer et des pressions atmosphériques dans cette région, influençant ainsi les modèles météorologiques à l'échelle mondiale. Il est causé par des interactions naturelles entre l'océan et l'atmosphère (Philander, 1998 ; Saint-Lu & Leloup, 2016). ENSO est le signal climatique le plus énergétique à l'échelle interannuelle. Il trouve son origine dans le Pacifique tropical et, comme son nom l'indique, l'ENSO oscille entre des événements anormalement chauds (El Niño) et froids (La Niña), qui se répètent environ tous les 2 à 7 ans (Enfield, 1989 ; Allan *et al.*, 1996). Les phénomènes El Niño et La Niña se développent se manifestent) en conjonction avec des variations de la pression atmosphérique entre la région indo-pacifique et l'Est du pacifique tropical. Ces variations de pression, ou oscillations australes, sont liées à la force des alizés du pacifique (Philander, 1998). Le phénomène El Niño, phase chaude d'ENSO, se traduit en général par des températures de surface de la mer anormalement chaudes et de fortes précipitations dans les parties centrale et orientale de l'océan pacifique équatorial. À l'inverse, le phénomène La Niña (traduit « l'enfant fille ») (Van Loon & Shea, 1985 ; Ravelo *et al.*, 1990), phase froide d'ENSO, se traduit par des températures anormalement froides et un déficit de précipitations dans ces régions. La phase El Niño est également associée à un ralentissement des

alizés, voire à des vents d'Ouest, alors que la phase La Niña est associée à un renforcement des alizés. Selon Tedeschi *et al.* (2015), les événements El Niño et La Niña provoquent des sécheresses dans certaines régions, des inondations dans d'autres, avec des conséquences importantes en particulier dans les pays vulnérables. Un trait remarquable de cet événement est l'apparition d'anomalie chaude dans l'océan Atlantique et Indien (Slingo & Annamalai, 2000). Slingo & Annamalai (2000) ont observé que les pluies exceptionnelles qui se sont abattues sur l'Afrique de l'Est au mois de septembre de 1997 sont attribuées à El Niño. Selon Joly *et al.* (2010), la téléconnexion entre ENSO et le sahel est bien établie en Afrique de l'Ouest, elle se manifeste par des sécheresses prolongées.

2.2. Méthodes d'interpolation, modélisation climatique et hydrologique

Cette section permet de comprendre les notions clés de cette thèse. D'une part, les notions liées à l'estimation des valeurs d'un point donné à partir de valeurs avoisinantes connues (méthode d'interpolation) et d'autres parts, les notions liées à la conception de modèles pour l'étude du climat et de l'hydrologie.

2.2.1. Méthodes d'interpolation

Il existe une multitude de méthodes d'interpolation spatiale, allant de la plus basique à la plus évoluée. Ces techniques sont en général regroupées en deux catégories. La première catégorie regroupe les méthodes d'interpolation déterministes qui ne modélisent pas la variable régionalisée par une fonction aléatoire. La seconde catégorie de méthodes stochastiques considère que toute valeur régionalisée résulte de la réalisation d'une variable aléatoire (Baillargeon, 2005). Les méthodes d'interpolation déterministes sont généralement subdivisées en trois catégories avec les techniques barycentriques, les techniques par partitionnement de l'espace, ainsi que les splines. Les techniques stochastiques regroupent quant à elles les techniques de régression classique, de régression locale et de krigeage qui inclut le concept de hasard et permettent le calcul d'erreurs de prévision (Arnaud & Emery, 2000 ; Baillargeon, 2005). Ces méthodes sont largement décrites dans la littérature spécialisée et l'objet de cette thèse n'est pas d'en faire une présentation exhaustive. Cependant, quatre différentes méthodes ont été retenues et vont être brièvement décrites afin d'en avoir une appréciation globale. Il s'agit de la méthode des polygones de Thiessen (déterministe, partitionnement de l'espace), de la méthode de l'inverse des distances (déterministe, barycentrique), des surfaces de tendances ou régression polynomiale (stochastique, régression

classique), et enfin de la technique de krigeage ordinaire (stochastique, krigeage). Toutefois, dans ce travail, deux des quatre méthodes décrites sont utilisées. Il s'agit de la méthode des polygones de Thiessen et celle du Krigeage.

2.2.1.1. Méthode des polygones de Thiessen

Les méthodes d'interpolation spatiale basée sur la loi du plus proche voisin ont été découvertes par Thiessen (1911). Ce dernier affecte à chaque observation de chaque pluviomètre un polygone d'influence, construit de telle sorte que chaque point du polygone est plus proche de son site d'observation que de tout autre site. Les polygones s'obtiennent en traçant les médiatrices des segments reliant les pluviomètres. Il est à noter que le découpage en polygones dépend uniquement de la répartition spatiale des sites d'observations. Si la densité des points d'échantillonnage est élevée, la représentativité peut être relativement correcte, mais si elle est faible, la représentativité sera très décevante par rapport à la réalité du phénomène (Comby, 1998; Laborde, 2000). L'interpolation par la méthode des polygones de Thiessen ne prend en compte que les sites d'observation voisins pour estimer une valeur non observée directement. En conséquence, elle se prive d'une grande quantité d'informations disponibles.

2.2.1.2. Méthode de krigeage

Les méthodes de krigeage se sont développées ces trente dernières années dans l'industrie minière et la climatologie. Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure spatiale propre à la variable estimée. On distingue trois principaux types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire, et le krigeage universel (Laborde, 2000). Les différentes formes de krigeage ont fait l'objet de nombreuses publications dans la littérature spécialisée. La méthode, en général, se construit en cinq (5) temps : (1) l'analyse exploratoire (c'est à dire la visualisation des données) ; (2) le choix du type de krigeage ; (3) l'analyse dite variographique (Baillargeon, 2005) c'est-à-dire l'estimation du variogramme, sa modélisation et le choix d'un modèle ; (4) la réalisation des interpolations ; enfin (5) l'évaluation de la qualité des estimations le plus souvent par une validation croisée. En outre, le krigeage est une méthode stochastique qui permet d'estimer des erreurs de prévision. Mais ce qui différencie réellement le krigeage des autres techniques précédemment décrites est qu'il est le seul à tenir compte de la structure de dépendance spatiale des données. Ainsi, pour beaucoup d'auteurs, le krigeage génère les prévisions spatiales les plus justes et

l'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par les autres méthodes stochastiques. Pour la communauté scientifique, le krigeage ressortirait donc gagnant de la comparaison avec les autres méthodes d'interpolation (Arnaud et Emery, 2000 ; Baillargeon, 2005).

2.2.1.3. Méthode de l'inverse des distances

Cette méthode prend en compte un plus grand nombre de données, en affectant une pondération plus élevée aux valeurs proches qu'aux valeurs éloignées. Généralement, la technique utilisée est celle de l'interpolation linéaire après triangulation, où chaque station constitue le sommet d'un réseau de triangles couvrant la totalité du territoire à analyser. Les valeurs sont ensuite interpolées linéairement sur chacun des côtés des triangles en fonction de la distance entre les sites d'observation. Cette méthode présente en théorie plusieurs points faibles, car les valeurs interpolées sont toujours comprises entre la valeur minimale et la valeur maximale, et elle ne tient compte que de la distance entre les sites d'observation et le point à estimer, et non de la configuration géométrique des sites d'observation entre eux. Cela implique que la représentativité de l'interpolation est directement corrélée à la densité du réseau, ce qui n'est d'ailleurs pas spécifique à cette méthode.

2.2.1.4. Méthode des surfaces de tendance

Il est possible de réaliser des ajustements de surfaces d'équations polynomiales à partir de données enregistrées ponctuellement. En effet, si les données se rapportent à des surfaces, il est possible de considérer dans la plupart des cas un point représentatif de chacune des surfaces. Les interpolations polynomiales sont aussi couramment appelées « Analyses en Surfaces de Tendance » (AST). La méthode d'interpolation spatiale par AST s'apparente à une technique de lissage spatial qui élimine les variations locales pour retenir une surface qui rend compte au mieux de la variabilité spatiale globale de la variable analysée (Renard & Comby, 2007). Il existe plusieurs variantes de l'AST, mais la méthode la plus employée réalise des ajustements de surfaces d'équations polynomiales bidimensionnelles à partir des données enregistrées sur les données ponctuelles des pluviomètres (Leblois & Bois, 2000). En général, l'ordre du polynôme est inférieur ou égal à trois. On obtient ainsi une série de surface de plus en plus complexe quand s'accroît l'ordre du polynôme. En outre, cette technique de régression classique est approximative et globale, car la surface interpolée générée ne passe pas forcément par les points d'observation, et tous les sites d'observation, même

ceux éloignés, vont influencer avec le même poids l'estimation en n'importe quel point de la zone d'étude.

2.2.2. Modélisation climatique

Dans l'optique de mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur le climat futur, et partant sur la disponibilité en eau, le nombre de simulations climatiques disponibles ne cesse d'augmenter. Ces simulations sont basées sur des processus physiques et se différencient entre elles par leur structure et leur résolution.

Sur cette base, plusieurs modèles climatiques existent, allant d'un simple bilan énergétique aux modèles du système Terre globaux représentant de façon complexe les différentes composantes du système Terre - atmosphère-océan et leurs interactions. Cette partie de l'étude évoque les deux grands types de modèles climatiques et la littérature scientifique associée.

2.2.2.1. Modèles Climatiques Globaux (MCG)

Les modèles climatiques globaux sont une représentation mathématique simplifiée du système climatique fondée sur des lois physiques (Kouakou, 2011). Ils sont des modèles climatiques à grande échelle qui sont basés sur les processus décrivant l'atmosphère et l'océan. Ces MCG se divisent en trois catégories : les Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM) ou les Modèles de Circulation Générale Océan-Atmosphère, les Ocean General Circulation Model (OGCM) ou les Modèles de Circulation Générale Océanique et les Atmosphere General Circulation Model (AGCM) ou les Modèles de Circulation Générale Atmosphérique. Les AOGCM regroupent des processus physiques décrivant l'interaction entre l'atmosphère, la cryosphère, les océans et la terre. La structure des modèles du système Terre (Earth System Model, ESM) est basée sur les mêmes processus que ceux contenus dans les AOGCM, mais prend aussi en compte le cycle carbonique et les processus biologiques et chimiques. Le choix des processus conservés pour la construction des modèles climatiques et la manière dont ils sont programmés influent sur le réalisme des simulations et leur façon de réagir aux différents forçages radiatifs. Différents modèles climatiques, basés sur différents choix, mènent donc à des résultats différents entre eux. L'analyse de ces différences permet d'évaluer l'incertitude propre au choix de simulations climatiques. Les MCG fonctionnent avec des paramètres aptes à simuler les principales caractéristiques de la distribution et de l'évolution du climat à très long terme. Cela permettrait de voir la réponse de l'atmosphère à certains forçages ou à des modifications d'origine anthropique. Ils ont une faible

résolution horizontale (> 100 km) et simulent le climat à l'échelle du globe (Seidou, 2017). L'espace est subdivisé en milliers de colonnes permettant de recouvrir la totalité de la surface terrestre et des océans. Les colonnes sont elles-mêmes subdivisées en plusieurs couches. Les MCG ont typiquement une résolution horizontale comprise entre 250 km et 600 km, de 10 à 20 couches verticales dans l'atmosphère, et parfois jusqu'à 30 couches dans les océans (Brulebois, 2016 ; N'Tcha, 2018 ; Kouyaté, 2020). La fréquence à laquelle les processus sont calculés à l'intérieur du modèle, constitue la résolution temporelle du modèle (Kouakou, 2011).

2.2.2.2. Modèles Climatiques Régionaux (MCR)

Les modèles climatiques régionaux sont des représentations mathématiques des processus physiques à petite échelle par rapport aux modèles globaux. Ce sont des modèles numériques semblables aux modèles globaux, mais ils ont une résolution de l'ordre de 10 à 50 km qui permet une meilleure représentation, par exemple, du relief présent dans le domaine du modèle. Les modèles régionaux commencent par la résolution des équations à partir des résultats d'un modèle global qui lui servent de conditions initiales. Les modèles climatiques régionaux sont obtenus en forçant les conditions aux limites régionales par un modèle global, ce qui permet de prendre en compte, au niveau régional, des informations sur la circulation générale atmosphérique, de l'influence des températures de surface des océans. La plupart des techniques de réduction d'échelle ou « downscaling » sont à sens unique (Kouakou, 2011).

Récemment, Heinzeller *et al.* (2018) et leurs partenaires, en collaboration avec les équipes de WASCAL et l'Université de Bonn ont développé des simulations régionales pour l'Afrique de l'Ouest de 12 km de résolution horizontale. Ces simulations permettent de combler les gaps en termes d'informations adéquates, d'améliorer la qualité des informations produites et d'anticiper sur les effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques. La résolution spatiale des modèles a été significativement améliorée. Au niveau régional comme au niveau global, les progrès continus de la connaissance, la représentation des phénomènes climatiques à l'amélioration des techniques de calcul numérique ont permis d'aboutir récemment à une nouvelle génération de modèles climatiques plus complets dits modèles à haute résolution (Modèles climatiques régionaux).

2.2.2.3. Scénarii climatiques

- **Définition de scénarii climatiques**

Un scénario climatique est une représentation cohérente du futur état du climat (Kouakou, 2011). Il repose non seulement sur des hypothèses concernant la croissance démographique et économique mais aussi sur la manière dont les sociétés réagiront à l'avenir à l'introduction de politiques telles que les taxes sur les combustibles fossiles riches en carbone. Les scénarii sont nécessaires pour évaluer l'incidence des changements climatiques et les mesures d'adaptation pour avoir des visions différentes des conditions susceptibles d'influer sur un système ou une activité donnée. Actuellement, les scientifiques travaillent avec des scénarii qui décrivent les évolutions d'émissions des gaz à effet de serre jusqu'en 2100. Cependant, ces scénarii comportent des éléments subjectifs et prêtent à interprétation. Cela ne veut pas dire qu'ils sont totalement arbitraires, car chacun d'eux reflète un état plausible du monde futur.

- **Description de scénarii climatiques**

Afin de représenter les évolutions possibles des émissions et pour permettre les modélisations climatiques, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a choisi de créer des scénarii d'émissions. De ce fait, quatre scénarios, Special Report on Emissions Scenarios (SRES) ont été développés par le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) à savoir A1, A2, B1 et B2.

La famille de scénario A1 est composée de trois groupes de scénarii caractéristiques des évolutions différentes des technologies énergétiques, A1F1 (Intensité de combustibles fossiles), A1B (Equilibre) et A1T (prédominance des combustibles non fossiles) (IPCC, 2008).

En dépit des résultats probants obtenus par le projet CMIP, le GIEC se voit de nouveau mettre en place des scénarii plus réalistes. En effet, la mise en place de nouveaux scénarios n'avait pas été envisagé à l'époque d'un développement aussi rapide des pays émergents. Pour des scénarii qui tiennent compte des réalités que vit la planète, la communauté scientifique a fait l'adoption de politiques climatiques dont il est désormais nécessaire d'intégrer les effets sur la réduction des émissions de gaz et les rétroactions en termes d'impacts et d'adaptation pour les systèmes considérés (Brulebois, 2016). Ces mécanismes n'étaient pas inclus dans les scénarios précédents. Il est aujourd'hui aussi envisagé d'avoir des évolutions des émissions globales de gaz à effet de

serre qui diminueraient après une phase de croissance au XXI^e siècle, ce qui oblige certains scénarii à être prolongés au-delà de 2100.

Dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, publié en 2013-2014, les experts ont défini quatre profils représentatifs d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (GES) pour le XXI^e siècle et au-delà. Ces trajectoires englobent un large éventail de possibilités, correspondant à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial (Guivarch & Cassen, 2015). Elles sont nommées RCP (Representative Concentration Pathways), profils représentatifs d'évolution de concentration de GES. Sur cette base, les climatologues décrivent les conditions climatiques et les impacts du changement climatique associés à chacune de ces quatre trajectoires.

Ces quatre trajectoires sont des scénarii de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300. Ils sont au nombre de quatre (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 et RCP8.5) comme l'illustre le Tableau II. Le canevas RCP2.6 correspond à une réduction des GES à l'échelle internationale. La famille RCP4.5 fait référence à une stabilisation de l'évolution du bilan radiatif en seconde partie du siècle. Le canevas RCP6 décrit un scénario de stabilisation dans lequel le forçage radiatif total est stabilisé peu de temps après 2100 dû à une politique climatique. La famille RCP8.5 décrit un scénario sans politique climatique à l'échelle internationale, scénario radiatif (scénario le plus pessimiste en termes de réchauffement climatique).

Tableau II : Caractéristiques principales des RCP

Nom	Forçage radiative	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5Wm ² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissante
RCP6.0	≈6Wm ² au niveau de stabilisation après 2100	≈850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	≈4,5Wm ² au niveau de stabilisation après 2100	≈660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ≈3Wm ² avant 2100 puis déclin	Pic ≈490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Une comparaison avec les anciens scénarios SRES (Figure 8), pour leur période commune, montre que le RCP 8.5, scénario extrême, est un peu plus fort que l'ancien scénario SRES dénommé A2.

Le RCP 6 est proche du scénario SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul profil d'évolution sans équivalent avec les anciennes propositions du GIEC est le RCP2.6 qui intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

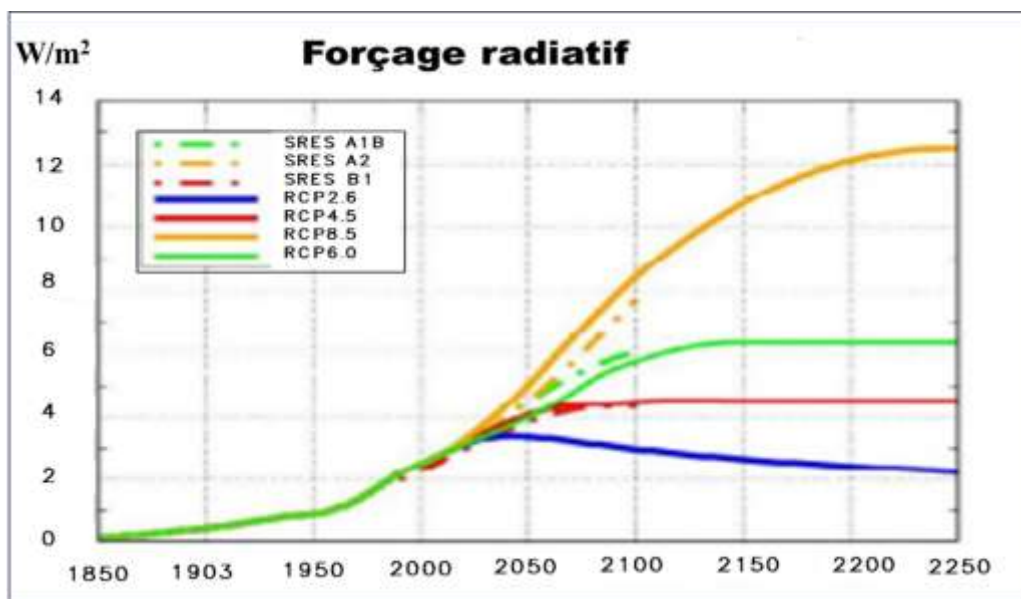


Figure 8 : RCP comparés aux SRES

Source : GIEC (2013)

En parallèle, les économistes et les sociologues travaillent sur des familles de scénarios nommés SSP (Shared Socioeconomic Pathways) qui se différencient par divers aspects de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation. À chaque RCP peuvent être associés plusieurs SSP. Cinq familles de scénarios ont ainsi été définies (Figure 9), le SSP1-1.9 qui n'a pas de RCP équivalent, le SSP1-2.6 qui est l'équivalent du RCP 2.6, SSP2-4.5 qui est l'équivalent du RCP4.5, SSP3-7.0 qui est l'équivalent à la fois du RCP6.0 et du RCP8.5 et le SSP5-8.5 qui est l'équivalent du RCP8.5 (Violaine & Maxime, 2022). Une telle approche permet un travail en parallèle et en cohérence des climatologues et des économistes.

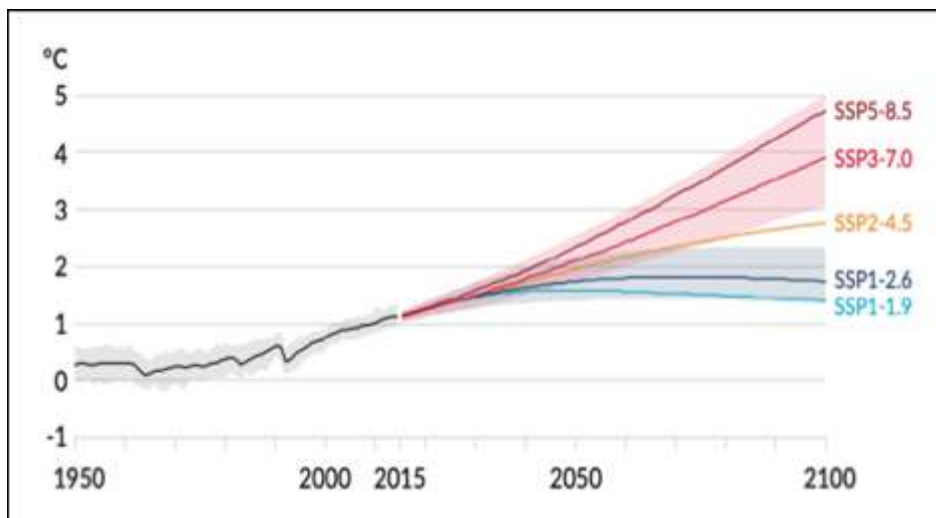


Figure 9 : Trajectoires de réchauffement planétaire selon les cinq scénarios SSPx-y retenus dans le résumé pour décideur du GIEC

Source : Violaine & Maxime (2022)

2.2.2.4. Faiblesses des modèles climatiques

Outre leur meilleure performance, les modèles climatiques présentent quelques faiblesses. En effet, ces modèles ont quelques difficultés à reproduire certains processus comme l'évapotranspiration continentale, le cycle du méthane ou encore la physique des nuages (Kouakou, 2011). De plus, la description de ces processus est souvent basée sur des données à une échelle inférieure qui ne peut être valide pour de larges mailles, car un modèle climatique génère une valeur moyenne par maille. La diversité des caractéristiques climatiques et des traits géographiques à l'intérieur de chaque maille est inévitablement simplifiée et donc l'utilisateur du modèle ne possède aucune information quant à la variabilité spatiale à l'intérieur d'une maille (Yeo, 2017). À ces incertitudes, s'ajoutent celles liées à l'évolution réelle de l'atmosphère. Du fait des résolutions spatiales et temporelles qui diffèrent, des processus pris en compte et des incertitudes énoncées ci-dessus, les résultats produits par les modèles climatiques varient considérablement. Malgré quelques imperfections du modèle climatique, leur degré de confiance a augmenté qualitativement. Ils reproduisent de façon satisfaisante les diverses composantes du climat tels que la répartition des zones climatiques, le rythme des saisons par endroit, les courants atmosphériques et océaniques, etc. (Badin, 2004).

2.2.2.5. Correction des sorties de modèles

Les simulations de température et de précipitations présentent souvent des biais importants dus à des erreurs systématiques des modèles ou à la discrétisation et à la moyenne spatiale dans les cellules de la grille. Ces erreurs entravent par conséquent l'utilisation de données climatiques simulées comme données d'entrée directes pour les modèles hydrologiques (Teutschbein & Seibert, 2012). Des méthodes de correction de biais sont utilisées pour minimiser l'écart entre les variables climatiques observées et simulées sur un pas de temps quotidien afin que les simulations hydrologiques pilotées par des données climatiques simulées et corrigées correspondent raisonnablement bien aux simulations utilisant des données climatiques observées. Les procédures de correction du biais utilisent un algorithme de transformation pour ajuster la sortie du modèle climatique des MCR. L'idée sous-jacente est d'identifier les biais entre les variables climatiques historiques observées et simulées par les MCR afin de paramétrer un algorithme de correction des biais utilisé pour corriger les données climatiques historiques simulées. Les méthodes de correction de biais sont supposées être stationnaires, c'est-à-dire que l'algorithme de correction et sa paramétrisation pour les conditions climatiques actuelles sont également supposés valables pour les conditions futures. Ainsi, le même algorithme de correction est appliqué aux données climatiques futures. Cependant, on ne sait pas dans quelle mesure une méthode de correction de biais fonctionne pour des conditions différentes de celles utilisées pour la paramétrisation. Une bonne performance pendant la période d'évaluation ne garantit pas une bonne performance dans des conditions futures modifiées (Rathjens *et al.*, 2016). Néanmoins, Teutschbein & Seibert (2012) fournissent une discussion détaillée et déclarent qu'une méthode qui fonctionne bien pour les conditions actuelles est susceptible de mieux fonctionner pour les conditions modifiées qu'une méthode qui fonctionne déjà mal pour les conditions actuelles. Les méthodes de correction de biais ont une limitation commune pour fournir des corrections précises : ils supposent que le modèle produit le même nombre ou un nombre supérieur de jours de pluie, indépendamment de la façon dont ceux-ci sont définis. Les méthodes basées sur la distribution ne nécessitent pas strictement un nombre égal ou supérieur de jours de pluie, mais si le modèle génère trop peu de jours de pluie, la méthode peut ne pas corriger correctement les sorties du modèle (Argüeso *et al.*, 2013). Ainsi, les méthodes de correction de biais n'ont pas corrigé efficacement les sorties du modèle, en particulier pour les méthodes de base moyenne et power transformation. Par conséquent, il est nécessaire

d'introduire des événements de précipitation supplémentaires grâce à une nouvelle adaptation de fréquence (Thiemeßl *et al.*, 2012).

2.2.2.6. Base de données CORDEX

L'expérience CORDEX (Jones *et al.*, 2011) vise essentiellement deux objectifs : fournir un cadre d'évaluation et de vérification de l'efficacité des modèles et concevoir une série d'expériences destinées à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation. Les résultats des MCRs seront ensuite pilotés par les conditions aux limites des modèles climatiques globaux (MCG) et des données ERA-Intérim. CORDEX est un projet international élaboré par le Programme mondial de recherche sur le climat. Il vise à étudier le climat régional et son évolution par la modélisation régionale. Il est soutenu par les plus grands centres de recherche internationaux sur le climat dont : Météo-France, le Met Office (Angleterre), l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace, France), le MPI (Max Planck Institute, Allemagne), le SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Suède) et d'autres, qui mettent en ligne sur une plateforme dédiée aux résultats de leurs simulations. Le projet d'intercomparaison des modèles atmosphériques (Gates *et al.*, 1999), mis en place au début des années 1990, et le projet d'intercomparaison des modèles océan-atmosphère (couplés) (CMIP) (Covey *et al.*, 2003) sont de parfaits exemples d'une collaboration réussie de la recherche sur le climat. CORDEX met à disposition des simulations issues de modèles régionaux (RCM), eux-mêmes forcés par des modèles globaux (GCM). CORDEX est organisé en 14 domaines (Figure 10) qui possèdent chacun leurs propres couples GCM/RCM. Ces couples GCM/RCM constituent une descente d'échelle dynamique et permettent aux projections ainsi obtenues d'atteindre une résolution spatiale relativement fine (0,11°, soit 12,5 km pour l'Europe). Les simulations appliquées à ces couples GCM/RCM couvrent les quatre scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) de réchauffement du climat issus du 5e rapport du GIEC : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6, et RCP 8.57.

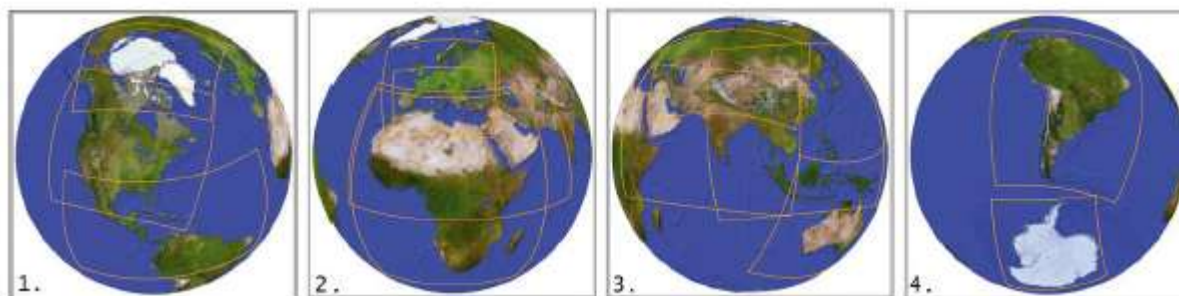


Figure 10 : Domaines du projet CORDEX

1. Arctique, Amérique du Nord et Amérique centrale. 2. Europe, Méditerranée, Moyen-Orient et Afrique. 3. Asie centrale, Asie du Sud et Asie du Sud-est, Australasie. 4. Amérique du Sud et Antarctique.

2.2.3. Modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques, les modèles hydrologiques distribués utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante (Nascimento, 1995). Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil « simple » permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc).

2.2.3.1. Définition d'un modèle et intérêt de la modélisation

Un modèle permet d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes. Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité (Haziza, 2007). Le modèle est destiné à aider et à répondre à des questions. Il est conçu en fonction de celles-ci et ne peut être utilisé que dans ce champ particulier (Kouakou, 2011). Son objectif principal est la réduction de la complexité naturelle. Les modèles pluie-débit servent en premier lieu à représenter dans le temps le cycle de l'eau, et permettent de transposer l'information climatique en information sur les écoulements (Benkaci, 2006). La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, sur la gestion des risques et notamment de la ressource. L'essentiel des problématiques liées à la modélisation pluie-débit a été

répertorié par Michel (1983) et Refsgaard & Abbott (1996). Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses à apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés. Si d'autres approches hydrologiques que la modélisation pluie-débit proposent des réponses à certaines de ces problématiques (analyse fréquentielle statistique sur les débits pour la prédétermination), cette dernière paraît cependant très profitable pour des questions supposant un traitement temporel continu, comme la prévision des débits. Dans ce cas, le fait de remonter à l'origine des débits (la pluie) permet en plus de profiter d'un délai supplémentaire par rapport à des méthodes n'exploitant que l'information sur les débits (Perrin, 2000).

2.2.3.2. Types de modèles hydrologiques

Depuis la conception des modèles pluie-débit, plusieurs modèles ont vu le jour. Ils se sont diversifiés en fonction des objectifs des modélisateurs et se classifient selon les critères suivants (Higy, 2000) :

- système à modéliser : concerne l'unité fonctionnelle fondamentale étudiée, tel que le grand bassin versant, le sous-bassin, le fleuve, les barrages, l'interaction bassin topographique-nappe, etc. C'est la première étape d'une conception d'un modèle, elle permet de définir les variables et les descripteurs pertinents pour décrire le système à modéliser ;
- degrés de causalité : implique la description des relations fonctionnelles des modèles ;
- discrétisation spatio-temporelle : aborde l'extrême imbrication des aspects physiques et hydrologiques, en leur grande variabilité spatiale et temporelle.

En des termes plus explicites, la classification des modèles peut se résumer aux données qu'ils intègrent. Par exemple, lorsque la modélisation est liée aux caractéristiques morphologiques du bassin versant ou partie du bassin versant, le modèle peut être classifié comme un modèle empirique, un modèle conceptuel, un modèle à base physique, global, distribué, semi-distribué, stochastique et déterministe (Benkaci, 2006).

- **Modèles empiriques**

Dans ces modèles, la transformation pluie-débit se fait non par l'application des lois physiques à un milieu et ses conditions aux limites, mais par l'examen des enregistrements des pluies et des débits (Nash & Sutcliffe, 1970). L'introduction des équations déterministes ou stochastiques

dégagées de toutes complexités dans ces modèles, est motivée par la conception de modèles aussi simples qu'ils soient.

Les méthodes empiriques (ou rationnelles) d'estimation pluie-débit peuvent être considérées comme une branche de l'hydrologie descriptive, plutôt que du domaine de l'hydrologie analytique (Benkaci, 2006).

- **Modèles conceptuels**

La transformation de la pluie en débit est une composante très complexe du cycle hydrologique qui engage différents facteurs à une échelle spatiale et temporelle différente. C'est dans cette approche, que les modèles conceptuels essaient de représenter le cycle hydrologique par une conceptualisation des différents mécanismes, en introduisant des hypothèses jugées capables de traduire la physique de la relation pluie-débit et reliées dans leur ordre conceptuel logique (Sorooshian & Gupta, 1983). Ces modèles considèrent le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité interconnectés, et sont censés représenter plusieurs niveaux de stockage suivant une dimension verticale. En hydrologie, ces modèles sont les plus utilisés, cependant, même s'ils peuvent s'interpréter conceptuellement, les paramètres utilisés sont généralement sans grande signification physique, ni corrélables à des caractéristiques du bassin.

- **Modèles physiquement fondés**

Ces modèles sont développés comme une alternative aux modèles conceptuels et globaux, à des fins de recherche parallèlement aux progrès de l'informatique. D'après leurs concepteurs, ils sont censés rendre compte des problèmes pour lesquels les modèles conceptuels sont a priori jugés inadéquats, tels que la prévision des effets des changements naturels ou anthropiques des caractéristiques du bassin versant, la variabilité spatiale des entrées et des sorties, le mouvement des polluants et des sédiments, la prévision des réponses pour des bassins non jaugés.

Un modèle physique peut être défini comme un modèle dont les relations fonctionnelles sont des équations phénoménologiques basées sur des principes physiques fondamentaux tels que les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement (Higy, 2000).

Les bases physiques de ces modèles, ont été développées à l'échelle microscopique, et dans certaines conditions aux limites telles l'homogénéité et l'isotropie. Leur validation à l'échelle macroscopique (bassin versant) est confrontée à la limite physique de certains paramètres, par

exemple, le modèle peut trouver une optimisation dans un domaine où la conductivité hydraulique fait apparaître des valeurs qui n'ont rien en commun avec sa définition usuelle.

La littérature hydrologique, offre une multitude et une diversité de modèles, dont les fonctions et les paramètres varient sensiblement d'un modèle à l'autre. Les modèles empiriques se caractérisent par une formulation mathématique dépourvue de toute réalité physique, et la frontière entre ces modèles et les modèles boîte noire, n'est pas exempte d'ambiguïté. Un modèle basé sur une régression linéaire entre la variable d'entrée (pluie), et la variable de sortie (débit) peut être considéré comme boîte noire du fait, de son interprétation du bassin comme un système, qui génère des débits à partir d'une série d'impulsions. Un modèle est décrit comme conceptuel, lorsque le cycle de l'eau est conceptualisé par un agencement de réservoirs, simulant une fonction bien définie du cycle hydrologique. Dans certains cas, un modèle conceptuel peut contenir des équations de vidange des réservoirs empiriques.

- **Modèle global**

Les modèles globaux considèrent le bassin versant comme une entité mathématique, de par leur conception simple, en matière de variables et de paramètres à introduire dans le modèle. Ils sont souvent appelés modèle "boîte noire". Le modèle global intègre les propriétés du bassin versant et des forçages et les résume de telle sorte que la relation soit directe entre pluie et débit (Galdos, 2006). Les équations qu'intègrent ces modèles sont des équations différentielles ordinaires qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale de processus, des entrées, des conditions aux limites et des caractéristiques géométriques du système (Borrell, 2004). Ces modèles qui décrivent les processus sous forme d'équations simplifiées issues de raisonnements empiriques présentent des limites en cas de spécificités locales sur le comportement hydrologique général. Les modèles GR (Génie Rural), HEC-1 (Hydrologic Engineering Center) et IHACRES (Identification of unit Hydrographs And Component flow from Rainfalls, Evaporation and Streamflow data) sont des modèles globaux utilisés pour la modélisation d'hydrosystèmes (Croke *et al.*, 2006 ; Halwatura & Najim, 2013 ; Djellouli *et al.*, 2015 ; Coulibaly *et al.*, 2018 ; Yao *et al.*, 2019 ; Castro & Maidment, 2020).

- **Modèles distribués**

Les modèles distribués prennent en compte la variabilité spatiale des processus et/ou des variables d'entrées et/ou des conditions aux limites et/ou des caractéristiques du bassin versant (Arnold *et*

al., 1993 ; Morin *et al.*, 1995 ; Kouadio, 2011 ; Twisa *et al.*, 2020). Pour représenter les hétérogénéités présentes dans le bassin, le modèle nécessite des données géographiques et/ou des mesures *in situ*. Le modèle distribué peut offrir des avantages tels que (i) capturer efficacement la variabilité spatio-temporelle des composantes du cycle de l'eau et (ii) permettre d'étudier les conséquences du changement d'échelle (Im *et al.*, 2009 ; Kiprotich *et al.*, 2021). L'intérêt de ces modèles, du fait qu'ils puissent intégrer l'évolution spatiale du système (exemple : changement d'occupation du sol), est de pouvoir les utiliser pour tester des scénarios futurs (Ghaffari *et al.*, 2010 ; Näschen *et al.*, 2019 ; Kiprotich *et al.*, 2021).

- **Modèles sémi-distribués**

Les modèles semi-distribués prennent naissance lorsque certains paramètres du système sont globalisés. Ces modèles tiennent compte de la variabilité des comportements paramètres hydrologiques. L'utilisation des modèles hydrologiques sémi-distribués est devenue très fréquent car ils permettent non seulement de décrire la situation passée mais aussi de tester les scénarios futurs en tenant compte des données physiographiques de la zone d'étude (Yan *et al.*, 2013 ; Mehdi *et al.*, 2015 ; Shrestha & Htut, 2016).

- **Modèle stochastique**

La modélisation stochastique est un terme générique dont le but principal est de représenter un comportement par des modèles probabilistes. Le plus souvent, les paramètres à modéliser comportent une part d'aléa (comme les précipitations, par exemple), mais ce n'est pas systématiquement le cas. Un modèle stochastique introduit toutefois au moins une variable ou un paramètre aléatoire. De ce fait, les valeurs ou ordres de grandeurs en sortie du modèle sont aussi des variables aléatoires (Gaume, 2007). Cette approche probabiliste est utilisée lorsque le phénomène étudié est aléatoire (Ledoux *et al.*, 2007). MODCOU est un exemple de modèle stochastique (Ledoux *et al.*, 2007 ; Coustau *et al.*, 2015).

- **Modèle déterministe**

Les hydrologues ont souvent classé les différents modèles selon leurs degrés de déterminisme. Un modèle est dit déterministe, si à partir de moyens d'observation, on obtient une adéquation correcte entre le modèle et les observations. Cette description permet de caractériser les modèles selon la nature de leurs variables et paramètres et/ou de leurs relations.

2.2.3.3. Modèles du Génie Rural (GR)

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle. Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soit, s'est imposée au cours de leur développement parce que de nombreuses hypothèses de fonctionnement, empruntées à l'arsenal des modèles conceptuels, étaient rejetées par des données observées lorsque de nombreux bassins étaient pris en compte et que le test en calage-contrôle était appliqué avec rigueur. C'est ainsi par exemple que les sous modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales. Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps. Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages, pour lesquelles le Cemagref développe des méthodologies spécifiques de mise en œuvre. Pour de simples objectifs de simulation, les modèles GR peuvent être appliqués aisément à partir d'un tableur (voir <http://www.cemagref.fr/webgr/>). Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant. La modélisation à pas de temps horaire, les interactions nappes-rivières, la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies ou d'informations hydrométriques en amont, une meilleure représentation des fontes nivales, constituent les pistes explorées actuellement.

Dans plusieurs bassins versants situés dans le Sud-Est de la France, le modèle GR2M (Génie Rural à deux paramètres au pas de temps mensuels) a été appliqué pour l'estimation de la ressource en eau (Lavabre *et al.*, 1993 ; Lespinas, 2008). Yang *et al.* (2000) et Dechemi *et al.* (2000) ont utilisé le modèle GR2M pour la simulation des écoulements et la prévision des risques d'inondations en période de crue respectivement en France et en Algérie. De même, Bouanami *et al.* (2013) ont

appliqué le modèle GR2M pour simuler le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Sikkak en vue de l'évaluation et la gestion de la ressource en eau à long terme du barrage Sikkak en Algérie. Le modèle a été mis en œuvre sur les bassins des grands fleuves de l'Afrique de l'Ouest et centrale dans les études d'impact de la variabilité et des changements climatiques sur les ressources en eau (Ouédraogo, 2001 ; Badin, 2004 ; Sighomnou, 2004 ; Kouassi, 2007 ; Kouakou *et al*, 2014 ; Badin *et al.*, 2012). À titre d'exemple, sur la disponibilité des ressources en eau de surface et souterraine du bassin de la Comoé, Kouakou (2011) a montré l'impact du changement climatique (sous le scénario A1B) des décennies à venir. Egalement, sur le bassin versant du fleuve Sassandra, il a déjà montré des performances satisfaisantes (Ouédraogo, 2001 ; Badin, 2004). GR2M est également utilisé pour la reconstitution des données hydrométriques. En effet, Bodian *et al.* (2011) ont utilisé ce modèle pour reconstituer les données hydrométriques de la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal. Les modèles GR2M et GR4J ont été très utilisés pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau en Côte d'Ivoire (Servat & Dezetter, 1991 ; Paturel, 2014 ; Diello, 2007 ; Kouassi, 2007 ; Dibi, 2008 ; Kouakou, 2011 ; Mangoua, 2013).

- **Paramétrisation des modèles pluie-débits**

Connaissant le fonctionnement interne des modèles, à partir des relations qui existent entre les variables d'entrées (observées), et celles calculées par des ajustements, par des coefficients ou par des paramètres caractérisant le modèle, l'estimation de ces paramètres est une étape essentielle de la modélisation. Les paramètres sont définis comme des coefficients des modèles hydrologiques, d'une équation ou d'une relation qu'on peut ajuster pour appliquer un modèle à des cas particuliers. Suivant la nature du modèle, les paramètres sont soit, calculés directement sur le terrain, soit estimés par calibration (calage) durant une certaine période plus ou moins longue, en optimisant (manuellement ou automatiquement), l'erreur d'ajustement des variables mesurées à leurs variables observées. Le but de ce calage, est de rapprocher le plus possible, le comportement du modèle de celui du bassin modélisé. Certains hydrologues ont mis en question l'existence d'un optimum, c'est à dire l'unicité d'un jeu de paramètres (Michel & Edijatno, 1991). Dans le cas du calage manuel, l'utilisateur cherche à déterminer un jeu de paramètres par tâtonnement qui lui permet d'obtenir un optimum. Ce dernier est réalisé lorsque l'erreur est minimisée entre les données simulées et observées, l'inconvénient du calage manuel est qu'il est fastidieux, et nécessite un temps relativement long. Dans le cas du calage automatique, les données simulées sont ajustées aux données observées, au moyen d'un programme informatique, cet algorithme est plus avantageux

que le calage manuel, mais présente l'inconvénient d'être influencé par certaines contraintes telles que l'interdépendance des paramètres ou autocorrélation (le changement de la valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres, ce qui entraîne des solutions équivalentes en termes de valeur du critère d'optimisation), la faible sensibilité de la fonction objective et la présence d'optima locaux, ou également la présence de plusieurs zones de convergences.

Certains auteurs (Duan *et al.*, 1992; Perrin, 2000) s'accordent à dire que la qualité de l'estimation des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de la robustesse de l'algorithme utilisé. Les chercheurs ont relativement bien compris la propagation des erreurs dans le cas d'un modèle à plus de dix paramètres, le nombre élevé de ces paramètres a souvent engendré le calage d'un modèle pour un optimum secondaire. Cette sur-paramétrisation de certains modèles par rapport à la quantité de données disponibles pour la calibration, peut conduire à une forte indétermination, les rendant non identifiables (Ambroise, 1991). Les difficultés d'optimiser les paramètres des modèles hydrologiques cachent des problèmes liés à la définition, l'existence et l'identification d'un jeu optimal de paramètres pour le modèle, ceci provenant principalement des défauts internes du modèle et secondairement d'erreurs de données (Perrin, 2000). Des analyses de sensibilité, ont montré que trois à quatre paramètres étaient en fait suffisants pour calibrer correctement des modèles conceptuels globaux (Sorooshian, 1991). Un autre problème aussi pertinent reste le nombre de données à caler. À ce propos, il n'existe pas de règles ou d'études communes pour tous les bassins.

En ce qui concerne la validation (ou vérification) du modèle, elle est une étape essentielle de la modélisation pluie-débit, non seulement pour la validation de la structure du modèle, mais aussi pour le choix des paramètres. Cette étape permet de vérifier la robustesse du calage en termes d'indépendance de jeu de paramètres vis à vis des données d'entrées et donc l'aptitude du modèle à fournir des simulations (ou des prévisions) dans diverses situations hydrologiques (Quesney, 2003). Étant donné que durant plusieurs années, les hydrologues ne se sont intéressés qu'aux résultats du modèle lors du calage, et donc la validation de ces modèles a été faite sur des bases erronées. Rakem (1999) a souligné l'important de distinguer le calage de la validation. Ainsi, le bon fonctionnement d'un tel modèle doit être pertinemment dépendant des résultats obtenus durant la phase de validation.

2.3. Barrage et fonctionnement

Les barrages constituent aujourd'hui des infrastructures hydrauliques stratégiques pour la gestion et la valorisation des ressources en eau douce à l'échelle mondiale. Ils sont principalement conçus pour assurer des fonctions essentielles telles que la production d'énergie hydroélectrique, l'irrigation agricole, l'alimentation en eau potable, la régulation des crues et la gestion des sécheresses. À travers ces services, les barrages contribuent de manière significative au développement socio-économique et à la sécurité hydrique et énergétique des États, en particulier dans les régions soumises à une forte variabilité hydro-climatique (Basheer *et al.*, 2021).

Cependant, la construction et l'exploitation des barrages modifient profondément le fonctionnement naturel des systèmes fluviaux. Les retenues associées entraînent une régulation des débits, une réduction de l'amplitude des crues et une augmentation des faibles écoulements, tout en favorisant la rétention sédimentaire. Une synthèse récente portant sur plus de mille grands barrages en Afrique a montré que ces ouvrages présentent en moyenne une efficacité de piégeage des sédiments supérieure à 80 %, induisant une altération des régimes hydro-géomorphologiques naturels et des dynamiques écologiques associées (Anderson *et al.*, 2025). Ces impacts sont d'autant plus importants que les rivières constituent des systèmes sensibles aux perturbations anthropiques et climatiques.

À l'échelle africaine, les barrages jouent un rôle croissant dans la transition énergétique et le développement des infrastructures hydrauliques. Le continent dispose en effet d'un potentiel hydroélectrique important, encore largement sous-exploité. Des projets de grande envergure, tels que le Grand Barrage de la Renaissance Éthiopienne (GERD), illustrent cette dynamique de valorisation de la ressource hydrique à des fins énergétiques et économiques (Basheer *et al.*, 2021). Néanmoins, ces aménagements soulèvent des enjeux majeurs en matière de gouvernance transfrontalière, de gestion intégrée des ressources en eau et de préservation des écosystèmes aquatiques. Par ailleurs, plusieurs travaux ont montré que la création de réservoirs peut induire des effets environnementaux et sanitaires non négligeables, notamment à travers la modification des milieux aquatiques et la prolifération de vecteurs de maladies hydriques comme le paludisme (Tusting *et al.*, 2021). Ces éléments rappellent la nécessité d'une approche équilibrée entre développement et durabilité environnementale.

En Côte d'Ivoire, le développement de l'hydroélectricité constitue depuis plusieurs décennies un pilier central de la politique énergétique nationale. Le pays dispose de plusieurs grands barrages,

parmi lesquels ceux de Kossou, Taabo, Buyo et Soubré, qui contribuent de manière significative à la production électrique nationale. Ces infrastructures jouent un rôle déterminant dans la sécurité énergétique du pays et dans la diversification du mix énergétique. Toutefois, à l'instar des autres régions tropicales, les barrages ivoiriens exercent également des influences notables sur les écosystèmes aquatiques. Des études menées sur le lac de Buyo ont révélé des modifications de la structure et de la composition spécifique des peuplements piscicoles, attribuées aux variations hydrologiques induites par la gestion du réservoir (Anderson *et al.*, 2021). De plus, l'évolution récente du climat, marquée par une intensification de la variabilité pluviométrique et l'augmentation de la fréquence des épisodes extrêmes, représente un enjeu majeur pour la pérennité de la production hydroélectrique nationale. Des travaux récents ont ainsi montré que la productivité énergétique du barrage de Buyo est fortement dépendante des fluctuations hydrologiques interannuelles, soulignant la nécessité d'optimiser les stratégies de gestion opérationnelle des retenues dans un contexte de changement climatique (Konan *et al.*, 2025). De manière générale, les barrages apparaissent donc comme des infrastructures indispensables pour soutenir le développement économique et énergétique. Toutefois, leur conception et leur exploitation doivent s'inscrire dans une démarche de gestion intégrée et durable des ressources en eau, prenant en compte à la fois les besoins humains, la préservation des équilibres environnementaux et les incertitudes liées aux changements climatiques.

Conclusion partielle

Cette partie a permis de passer en revue les thématiques relatives à l'étude. La compréhension de ces thématiques est vitale pour une méthodologie cohérente et concise. Ces thématiques ont concerné les généralités sur les changements climatiques, sur la modélisation climatique ainsi que la modélisation hydrologique. Il est à noter que les modèles climatiques ne font pas tous l'unanimité sur les prévisions attendues. Alors, pour une meilleure estimation du climat futur, plusieurs techniques sont utilisées pour le choix du modèle pour une bonne modélisation reflétant la réalité. Concernant, la modélisation hydrologique, il existe une multitude de modèles pour la description de processus hydrologiques. Le choix dépend des échelles spatiale et temporelle de la modélisation et des objectifs à atteindre.

PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Chapitre 3 : Données et Matériel

Introduction partielle

Ce chapitre décrit les données et outils mobilisés dans le cadre de cette étude. Il présente d’abord les différentes sources d’information utilisées, notamment les observations climatiques et hydrométriques, ainsi que les données issues des modèles climatiques régionaux. Il expose ensuite les outils de traitement et d’analyse mis en œuvre, incluant les logiciels de bureautique et de cartographie, ainsi que les environnements de calcul scientifique. Une attention particulière est portée au modèle hydrologique GR4J, utilisé pour la simulation des débits, et aux méthodes de correction appliquées aux sorties des modèles climatiques. L’ensemble de ces éléments constitue l’ossature technique nécessaire à l’évaluation des impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant du fleuve Sassandra.

3.1. Données de l’étude

Ce sont les données climatiques observées, hydrométriques et de production de l’hydroélectricité, d’une part, et de sorties de modèles climatiques, d’autre part (Tableau III).

3.1.1. Données climatiques

Les données de précipitations moyennes, de températures minimales et maximales ont été utilisées. Elles sont au pas de temps journalier et couvrent la période 1971-2020. Il faut préciser que les données de températures sont disponibles qu’aux stations synoptiques qui sont au nombre de trois (Daloa, Man et Odiénné) sur le bassin. Elles ont été fournies par la SODEXAM / Direction de la Météorologie Nationale. La figure 11 présente la répartition des stations dans le bassin versant. Certaines stations contiguës au bassin versant ont été utilisées du fait de leur influence directe à celui-ci.

3.1.2. Données hydrométriques

Les données hydrométriques sont celles des stations du fleuve Sassandra à Piébli et de la rivière N’Zo à Kahin (Figure 11). Elles ont été fournies par la Direction de l’Hydrologie (DH) et sont au pas de temps journalier. Ces données couvrent la période 1981-2001. Au niveau du barrage de Buyo, des données de lame d’eau, de débits de production et de volumes d’eau déversés ont été également collectées auprès de la Direction du barrage de Buyo. Ces dernières couvrent la période

2005-2023. Ces données ne sont pas accessibles au public et leur diffusion est soumise à des restrictions administratives ; seules les informations jugées nécessaires à l'étude nous ont été communiquées. La chronique disponible couvre la période 2005-2023, ce qui constitue une série relativement courte pour une analyse hydrologique complète.

Cependant, pour les objectifs de cette étude, centrés sur l'évaluation de l'influence du climat sur la production hydroélectrique et sur l'identification des tendances récentes, cette période a été considérée comme suffisante. L'utilisation de ces données permet ainsi d'analyser les variations hydrologiques récentes et de relier les conditions climatiques aux performances de production du barrage, tout en respectant les contraintes liées à la confidentialité et à la disponibilité des données critiques.

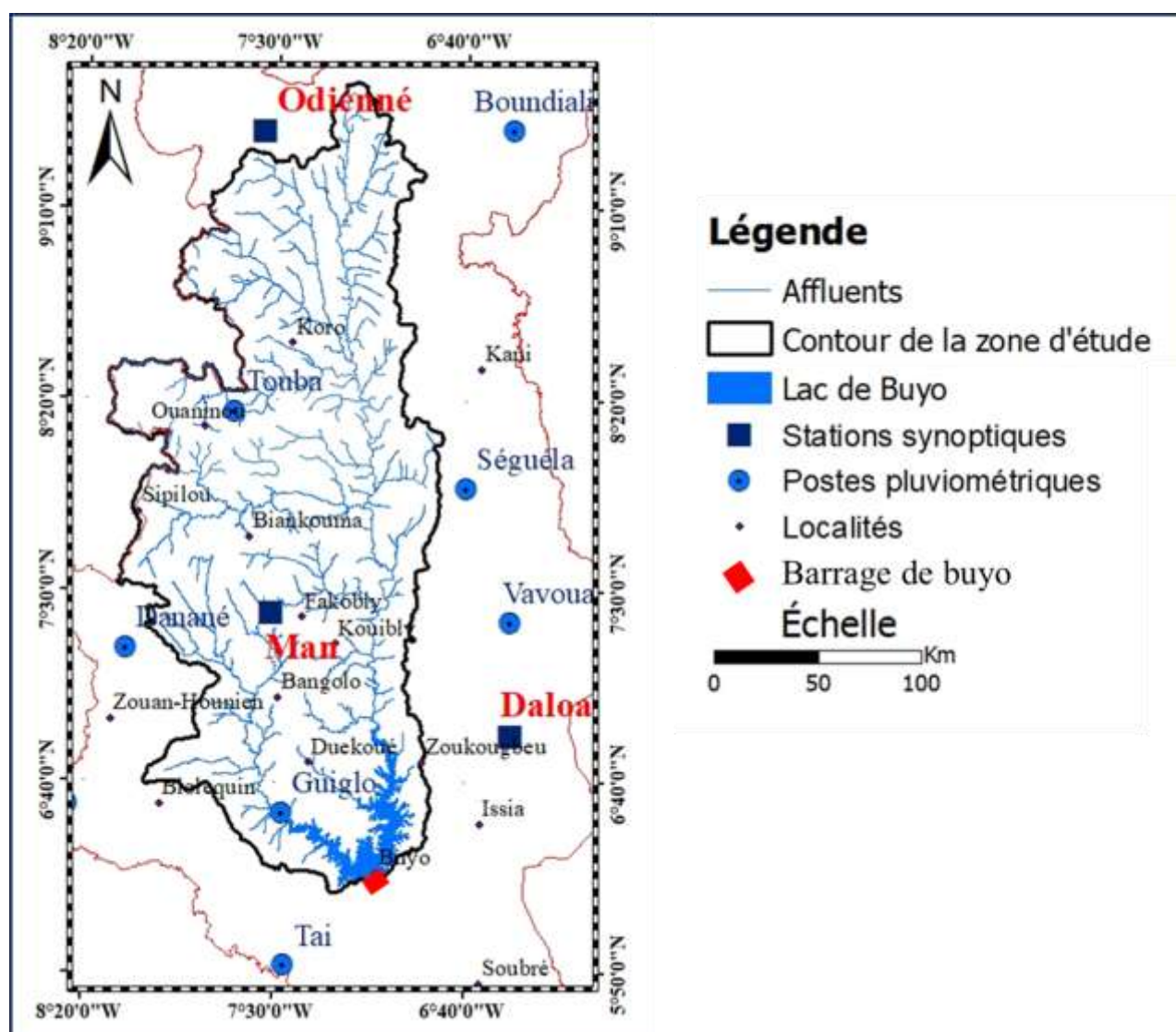


Figure 11 : Stations météorologiques et hydrométriques de la zone d'étude

Tableau III: Récapitulatif des stations hydro-climatiques de la zone d'étude

Type de stations	Noms	Longitude	Latitude	Variables	Lacunes
Postes pluviométriques (1971-2020)	Boundiali	-6,4667	9,5167	Pluie	1980, 2003-2011
	Danané	-8,1500	7,2500	Pluie	1980, 1986
	Guiglo	-7,4667	6,5333	Pluie	2005-2009
	Séguéla	-6,6667	7,9500	Pluie	1997, 1999-2000
	Tai	-7,4500	5,8667	Pluie	1993-1994, 2003-2013
	Touba	-7,6833	8,2833	Pluie	1990, 1994-2016
	Toulépleu	-8,4000	6,5667	Pluie	2003-2019
	Vavoua	-6,4667	7,3667	Pluie	Pas de lacunes
	Daloa	-6,4667	6,8667	Pluie, Températures	Pas de lacunes
	Man	-7,5167	7,4000	Pluie, Températures	Pas de lacunes
Stations synoptiques (1971-2020)	Odienné	-7,5667	9,5000	Pluie, Températures	Pas de lacunes
Stations hydrométriques (1981-2001)	Kahin	-7,6269	6,9092	Débits	1971-1980
	Piébli	-7,0669	7,7083	Débits	1971-1980
Barrage de Buyo (2005-2023)	Buyo	-7, 051	6,284	Cote journalière	Pas de lacunes

3.1.3. Données de sorties de modèles climatiques régionaux

Les données mensuelles de températures (minimales et maximales) et les précipitations de 10 modèles climatiques régionaux du programme CORDEX-Africa (Tableau IV), sous les scénarii d'émission RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisées. Ces modèles ont tous une résolution spatiale de 50 km soit environ 0,44 degré. Deux périodes ont été définies sous ces deux scénarii pour simuler le climat futur : la période 2021-2040 comptant pour l'horizon 2030 et la période 2041-2060 comptant pour l'horizon 2050. La période de contrôle est de 1981-2005 pour tous les modèles.

Le choix du modèle régional RCA4 du projet CORDEX-Africa repose sur sa performance éprouvée pour l'Afrique et sur la disponibilité des données pour différents bassins versants et zones climatiques. RCA4 a démontré sa capacité à reproduire avec précision les variables climatiques historiques, notamment les températures et précipitations, et figure systématiquement parmi les

modèles les mieux adaptés pour capturer les cycles saisonniers et les distributions régionales des variables climatiques (Diaconescu *et al.*, 2018). L'utilisation d'un ensemble de 10 simulations RCA4, chacune forcée par un GCM différent (IPSL, NCC, MIROC, CCCma, NOAA, MOHC, ICHEC, CNRM, MPI, CSIRO), permet de réduire l'incertitude liée aux forçages climatiques globaux et d'obtenir des projections plus robustes et représentatives sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Enfin, bien que d'autres RCM de CORDEX-Africa existent (REMO2009, CCLM4, RACMO22T), ils ne disposent pas de la même diversité de forçages GCM ni de continuité des séries historiques et futures, limitant leur utilisation pour un ensemble multi-modèle cohérent. L'approche consistant à comparer plusieurs RCA4 forcés par différents GCM permet donc de choisir les modèles les plus adaptés à la zone, garantissant des analyses climatiques fiables et pertinentes pour les horizons futurs.

Tableau IV : Modèles climatiques régionaux et leurs origines

<i>Modèles</i>	<i>Institut</i>	<i>Pays</i>
RCA4 (CCCma-CanAM4)	CCCma	Canada
RCA4 (CNRM-CM5)	CNRM	France
RCA4 (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-QCCCE	USA
RCA4 (ICHEC-EC-EARTH)	ICHEC	Irlande
RCA4 (IPSL-IPSL-CM5A-MR)	IPSL	France
RCA4 (MIROC-MIROC5)	MIROC	Japon
RCA4 (MOHC-HadGEM2-ES)	MOHC	Brésil
RCA4 (MPI-M-MPI-ESM-LR)	MPI-M	Allemagne
RCA4 (NCC-NorESM1-M)	NCC	Norvège
RCA4 (NOAA-GFDL-ESM2M)	NOAA-GFDL	USA

Source : www.cordex.org (Consulté en Août 2022)

3.2. Outils de traitement des données

Pour les besoins des traitements et d'analyses des données, de simulations et de cartographie, plusieurs logiciels ont été utilisés.

3.2.1. Logiciels de bureautique

Le tableur Microsoft Excel 2021 de la suite bureautique développé par Microsoft a été utilisé pour :

- organiser les données climatiques ;
- calculer les caractéristiques physiographique de la zone d'étude ;
- construire les graphes et courbes.

Pour la rédaction du mémoire, le traitement de texte Word a été utilisé.

3.2.2. Logiciel de cartographie ArcGis 10.8

Les systèmes d'information géographiques (SIG) sont considérés comme l'une des technologies de l'information les plus performantes, car permettent d'intégrer les connaissances provenant de sources multiples et à créer un environnement pluri-secteurs. Il réunit un environnement de visualisation performant et une puissante infrastructure d'analyse et de modélisation spécialement adaptée à la géographie.

Tous les traitements des données spatiales ont été effectués à l'aide de ArcGIS 10, de la famille de logiciels développés par la compagnie américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il comprend une suite d'applications intégrées les unes aux autres qui sont ArcMap, ArcToolbox et ArcCatalog.

- ArcMap : application principale d'ArcGis qui permet de cartographier et traiter les données ;
- ArcToolBox : contient tous les outils qui s'applique sous ArcMap ;
- ArcCatalog : un explorateur de données cartographiques qui permet d'organiser, prévisualiser, rechercher et décrire les données géographiques (méta données).

3.2.3. Modèle GR4J

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres, développé sous Excel. Sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin. Il permet entre autres la reconstitution ou l'extension de séries de débit, la prédétermination des

débits, la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant et la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages.

3.2.3.1. Description mathématique du modèle GR4J

Un schéma de la structure est donné à la Figure 12 ; P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

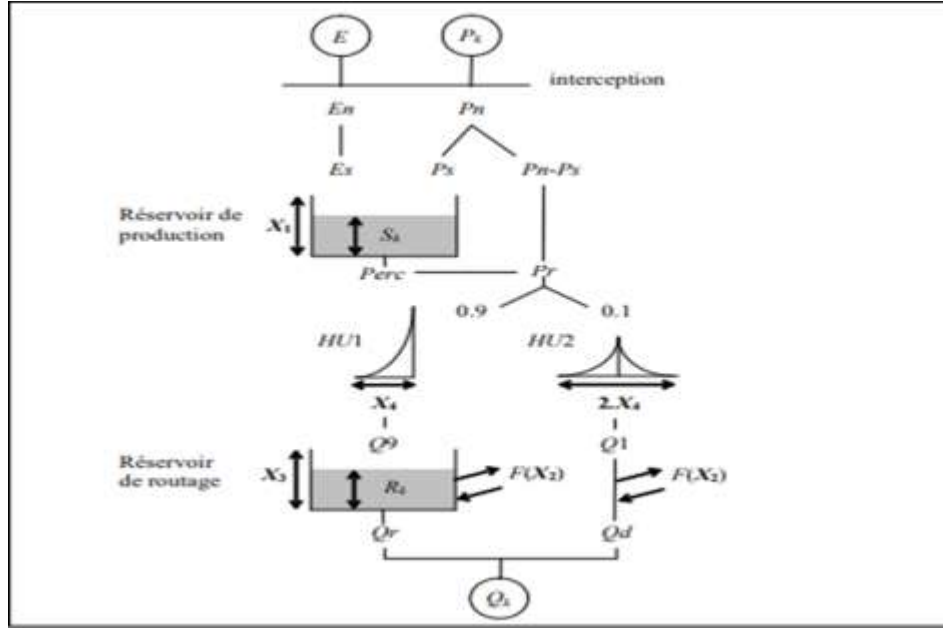


Figure 12 : Schéma de la structure du modèle GR4J

- **Neutralisation**

La première opération est la neutralisation de P_k par E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n calculée par :

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } E_n = 0 \quad (1)$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P_k \quad (2)$$

- **Fonction de rendement**

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)} \quad (3)$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k . Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1} \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)\right)} \quad (4)$$

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad (5)$$

- **Percolation**

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S'}{9X_1} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (6)$$

le contenu du réservoir devient :

$$P_{Tr} = P_{St} + \frac{P_{St} \times \Delta_{alt} \times G_r}{100} \quad (7)$$

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad (8)$$

et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \quad (9)$$

$$P_{Tr} = P_{St} + \frac{P_{St} \times \Delta_{alt} \times G_r}{100} \quad (10)$$

- **Hydrogrammes unitaires**

Pr est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire $UH1$ et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique $UH2$. $UH1$ et $UH2$ dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de $UH1$ exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement $SH1$ et $SH2$, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. $SH1$ est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t \leq 0, SH1(t) = 0 \quad (11)$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4, SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (12)$$

$$\text{Pour } t \geq X_4, SH1(t) = 1 \quad (13)$$

$SH2$ est définie de façon similaire par :

$$\text{Pour } t \leq 0, SH(2t) = 0 \quad (14)$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4, SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (15)$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2.X_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{1}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (16)$$

$$\text{Pour } t \geq 2.X_4, SH2(t) = 1 \quad (17)$$

Les ordonnées de $UH1$ et $UH2$ sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (18)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (19)$$

où j est un entier.

À chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0,9 \sum_{j=1}^l UH1(j) Pr(k-j+1) \quad (20)$$

$$Q1(k) = 0,1 \sum_{j=1}^l UH2(j) Pr(k-j+1) \quad (21)$$

où $l = \text{int}(X_4) + 1$ et $m = \text{int}(2.X_4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

- **Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique**

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (22)$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas

de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- **Réservoir de routage**

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme $UH1$ et F :

$$R' = \max(0 ; R_k + Q9(k) + F) \quad (23)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (24)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad (25)$$

- **Écoulement total**

La sortie $Q1$ de l'hydrogramme $UH2$ est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F) \quad (26)$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \quad (27)$$

3.2.3.2. Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X1: capacité du réservoir de production (mm)

X2: coefficient d'échanges souterrains (mm)

X3: capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4: temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j).

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau V.

Tableau V : Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1	350	100 ; 1200
X2	0	- 5 ; 3
X3	90	20 ; 300
X4	1,7	1,1 ; 2,9

Source : Andréassian *et al.* (2009)

3.2.3.2.1. Optimisation des paramètres du modèle

La méthode d'optimisation utilisée est le Solveur sous Excel. Il permet de rechercher la valeur optimale d'une formule dans une cellule, appelée cellule cible de la feuille de calcul. Il fonctionne avec un groupe de cellules associées, soit directement, soit indirectement, à la formule de la cellule cible. Il adapte les valeurs des cellules à modifier, appelées cellules variables, pour fournir le résultat spécifié à partir de la formule de la cellule cible. Les contraintes pour limiter les valeurs susceptibles d'être utilisées comme modèles par le Solveur sont posées, et ces contraintes font référence à d'autres cellules qui ont une incidence sur la formule de la cellule cible.

- **Cellule cible à définir**

La cellule cible est la cellule dans laquelle le modélisateur souhaite attribuer une valeur maximale du critère de Nash. Cette cellule contient la formule du critère de Nash.

- **Cellules variables**

Ce sont les cellules susceptibles d'être modifiées jusqu'à ce que les contraintes du modèle soient satisfaites et que la valeur indiquée dans la cellule cible à définir atteigne sa cible. Les cellules variables doivent être liées directement ou indirectement à la cellule cible.

3.2.3.2.2. Critère d'optimisation du modèle

La fonction critère permet de juger la qualité d'ajustement du modèle et facilite la comparaison entre bassins versants. Le critère utilisé ici est celui de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) à la suite de chaque simulation. Ce critère se calcule selon la formule suivante (équation 28) :

$$Nash = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \overline{Q_c})^2}} \times 100 \quad (28)$$

Où :

N : représente la taille de la série, Q_o : débit observé pour le pas de temps i en m³/s ; Q_c : débit calculé pour le pas de temps i en m³/s ; $\overline{Q_c}$: débit moyen observé en m³/s ;

La performance du modèle peut être jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash :

- Nash > 90% : le modèle est excellent ;
- 80% < Nash < 90% : le modèle est très satisfaisant
- 60% < Nash < 80% : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60% : le modèle n'est pas satisfaisant.

Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash est proche de 100%. Cependant, un critère de moins de 60% ne donne pas une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle (Nash & Sutcliffe, 1970) .

3.2.4. Outil de correction des sorties de modèles climatiques régionaux

Le CMhyd est un outil de correction de sorties de modèles climatiques. Il a été conçu pour fournir des données climatiques simulées qui peuvent être considérées comme représentatives de l'emplacement des jauges utilisées dans une configuration de modèle de bassin versant. Par conséquent, les données du modèle climatique doivent être extraites et corrigées du biais pour chacun des emplacements des jauges. Il est utilisé pour la correction des sorties des modèles climatiques du projet CORDEX. Il est disponible suivant le lien :

<https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>

Les procédures de correction du biais utilisent un algorithme de transformation pour ajuster la sortie du modèle climatique. L'idée sous-jacente est d'identifier les biais entre les variables climatiques historiques observées et simulées afin de paramétrer un algorithme de correction des biais utilisé pour corriger les données climatiques historiques simulées (Figure 13). Les méthodes de correction du biais sont supposées être stationnaires, c'est-à-dire que l'algorithme de correction et sa paramétrisation dans des conditions climatiques actuelles sont supposées valables également pour les conditions futures. Ainsi, le même algorithme de correction est appliqué aux données

climatiques futures. Les méthodes de correction de biais reposent sur l'hypothèse que les relations statistiques établies entre le modèle climatique et les observations pendant la période historique restent valables dans le futur. Or, sous changement climatique, la distribution des variables, la fréquence des extrêmes et même la structure des processus physiques peuvent évoluer. Ainsi, une méthode qui montre de bonnes performances pendant la période d'évaluation n'est pas nécessairement fiable lorsque les conditions climatiques sortent du domaine pour lequel elle a été paramétrée. Les méthodes de correction de biais reposent sur l'hypothèse que les relations statistiques établies entre le modèle climatique et les observations pendant la période historique restent valables dans le futur. Or, sous changement climatique, la distribution des variables, la fréquence des extrêmes et même la structure des processus physiques peuvent évoluer. Ainsi, une méthode qui montre de bonnes performances pendant la période d'évaluation n'est pas nécessairement fiable lorsque les conditions climatiques sortent du domaine pour lequel elle a été paramétrée. Dans le cadre de cette étude, la méthode du quantile mapping a été utilisée pour la correction des sorties de pluies et des températures, à l'échelle journalière.

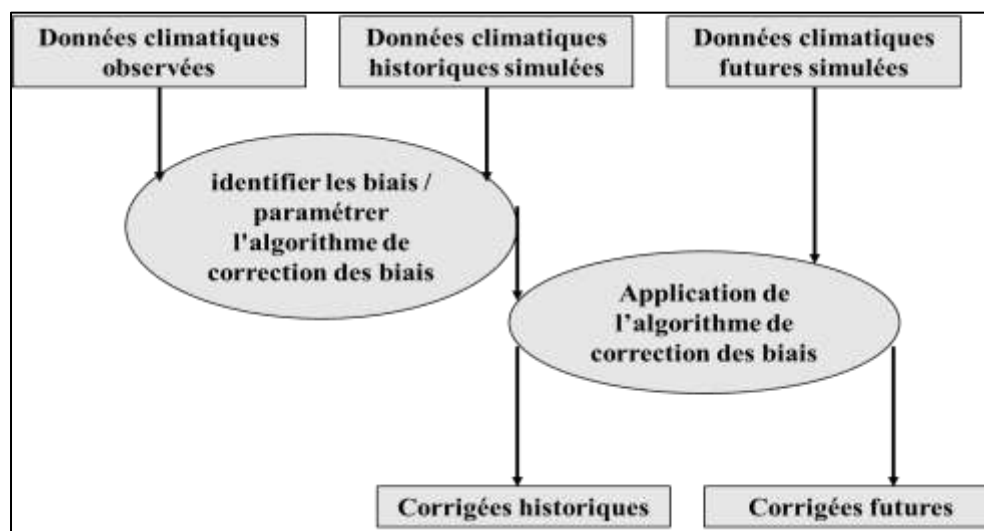


Figure 13 : Procédure de correction des biais avec le CMhyd

3.2.5. Logiciel R-Studio

Le logiciel R-Studio est une famille de logiciels de restauration et de récupération de données puissants et économiques. Fort des nouvelles technologies uniques de récupération de données, c'est une solution de récupération de données complète pour récupérer des fichiers.

Il fonctionne sur les disques locaux et réseau, même si ces partitions sont formatées, endommagées ou supprimées. Avec une flexibilité de réglage des paramètres, R donne un contrôle absolu sur la

récupération des données. C'est un logiciel comportant des programmes avancés du tableur Excel. Il permet d'analyser et de simuler, des données statistiques descriptives des séries temporelles, moyennes, écart-types, indices, tendances, analyses de variances, régressions simples et multiples, coefficients de corrélation, etc.

La version 3.4.4 a été utilisée pour la récupération des métadonnées générées par les modèles et aussi pour le calcul des indices climatiques.

Conclusion partielle

Pour réaliser cette étude, des données historiques climatiques, hydrologiques et de production d'énergie hydroélectrique, en occurrence les niveaux d'eau collectés dans la retenue du barrage ont été auprès de plusieurs structures compétentes. Il s'agit entre autres de la SODEXAM à travers la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), la Direction de l'Hydrologie et la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE). Des outils statistiques ont également été utilisés pour l'analyse des données.

Chapitre 4 : Méthodes

Introduction partielle

Ce chapitre est consacré à la démarche méthodologique adoptée pour analyser la variabilité climatique et hydrologique du bassin versant du fleuve Sassandra et son influence sur la production hydroélectrique du barrage de Buyo. Il débute par le contrôle qualité et le comblement des données climatiques et hydrométriques, afin de garantir la fiabilité des séries utilisées. La variabilité climatique et hydrologique est ensuite caractérisée à différentes échelles temporelles, avant d'examiner l'évolution future du climat à partir des sorties de modèles climatiques régionaux et d'en évaluer les incidences sur le fonctionnement hydrologique du bassin. Enfin, le chapitre s'intéresse aux conséquences de ces dynamiques sur la production électrique, à travers l'analyse de la lame d'eau utile, la définition de niveaux de vigilance et la projection de scénarios d'évolution future.

4.1. Contrôle et comblement des données climatiques et hydrologiques

Cette étape consiste à faire l'inventaire des données et à les contrôler. Cette dernière se résume à la gestion des données manquantes, l'harmonisation de séries de données et l'extraction de caractéristiques pertinentes.

4.1.1. Contrôle des données climatiques

Le résultat des études d'impact du changement climatique, dépend de la qualité des données utilisées. Le contrôle de qualité a été fait sur les températures et les précipitations. Il a consisté à la vérification des valeurs déraisonnables, celles des précipitations négatives et des températures minimales supérieures aux températures maximales, à l'identification des valeurs aberrantes, c'est-à-dire les valeurs qui sont hors de l'intervalle (Zhang, 2004) :

$$[\bar{m} - n. \delta; \bar{m} + n. \delta] \quad (29)$$

ou $\bar{m}$: désigne la moyenne, δ : l'écart-type de la série chronologique et n : le paramètre du logiciel RClimDex qui est un nombre à entrer par l'utilisateur, par défaut égal 3 pour la température et 200 pour la pluviométrie. Selon Zhang (2004), la détection des valeurs aberrantes repose sur un seuil de ± 3 écarts-types pour les températures symétriques, tandis qu'un seuil beaucoup plus large de 200 écarts-types est utilisé pour les précipitations afin de préserver les fortes pluies naturelles. Toute donnée déclarée aberrante est corrigée avec l'appui du gestionnaire de la base de données de

la Direction de la météorologie nationale de Côte d'Ivoire. Dans le cas échéant, elle est déclarée manquante. La reconstitution consiste à combler les données manquantes dans une série chronologique. Les modalités et la difficulté de la reconstitution sont très variables selon la durée de la période.

4.1.2. Contrôle des données hydrométriques et de niveaux d'eau

- **Contrôle des données hydrométriques**

Pour la reconstitution des débits manquants, le modèle GR4J est utilisé. En effet, cette démarche permet d'avoir des résultats plus fins compte tenu du pas de temps journalier des données. En effet, la méthode consiste à faire un calage du modèle suivi d'une validation et enfin de la reconstitution des débits manquants.

- **Contrôle des données de niveaux d'eau**

Les données collectées ont été préalablement traitées afin de garantir leur fiabilité. La détection des valeurs aberrantes a permis d'identifier les observations très différentes de la majorité des données. Ces valeurs peuvent être beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que la moyenne, ou se situer très loin des valeurs centrales d'un groupe. Des méthodes basées sur les quartiles ont également été utilisées pour repérer les points inhabituels en comparant les valeurs aux extrêmes de la distribution. Une fois identifiées, les valeurs aberrantes peuvent être supprimées, corrigées ou conservées si elles correspondent à de véritables phénomènes extrêmes. Ce prétraitement permet d'obtenir des données cohérentes, fiables et prêtes pour l'analyse.

4.2. Caractérisation de la variabilité climatique et hydrologique

4.2.1. Caractérisation de la variabilité climatique

Les paramètres climatiques sur lesquels portent la caractérisation sont les précipitations et la température. Seules, les précipitations seront caractérisées du fait de leur forte variabilité spatiale et temporelle. La méthodologie portera sur l'analyse des normales pluviométriques, des décennales pluviométriques, des indices de sécheresse pluviométrique, des indices des extrêmes climatiques.

4.2.1.1. Normales et décennales pluviométriques

La norme météorologique est la moyenne d'une série la plus longue possible pour valider les occurrences cinquantennales ou centennales. Elle désigne une moyenne sur 30 ans (Ouedraogo *et*

al., 1998 ; Kouassi *et al.*, 2010). Ainsi, les normales pluviométriques représentent des moyennes glissantes de 30 ans se succédant les unes aux autres tous les 10 ans. Pour caractériser la dynamique des régimes pluviométriques saisonniers, les écarts entre la normale de référence (1971-2000) et les autres normales (1991-2020 et 1981-2010) sont déterminés.

Pour la caractérisation de la variabilité climatique par les décennales pluviométriques, la démarche consiste à déterminer chaque 10 ans la moyenne pluviométrique. Sur la période de l'étude, cinq dernières décennies portant sur les trois régimes pluviométriques du bassin versant du fleuve Sassandra (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 et 2011-2020) sont déterminées. Ainsi, les écarts entre la normale de référence (1981-2010) et les autres décennales sont déterminés pour caractériser les variations intra-saisonnières.

4.2.1.2. Indices climatiques

L'indice standardisé de précipitations (McKee *et al.*, 1993; Hayes *et al.*, 1996) est développé pour quantifier le déficit pluviométrique à des échelles de temps multiples. Il est adopté en 2009 par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) comme un instrument mondial pour caractériser les sécheresses météorologiques, aux termes de la « Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse » (Jouilil *et al.*, 2012). D'après Bergaoui & Alouini (2002) et Ali & Lebel (2009), cet indice donne la sévérité de la sécheresse dans une classification. Les valeurs négatives indiquent une sécheresse alors que les valeurs positives indiquent une situation d'humidité.

Il est exprimé mathématiquement par l'équation (30) :

$$ISP = \frac{P_i - P_m}{\delta} \quad (30)$$

Avec P_i : pluie du mois ou de l'année i ; P_m : pluie moyenne de la normale 1981-2010 ; S : écart-type de la normale 1981-2010.

Une classification de la sécheresse est faite suivant les valeurs de l'ISP (Tableau V). Il est aussi possible de faire la cartographie des indices pluviométriques annuels par la méthode de krigeage.

Tableau VI : Classification des séquences de sécheresse climatiques selon l'ISP

Valeur de l'ISP	Séquence de sécheresse	Valeur de l'ISP	Séquence humide
-----------------	------------------------	-----------------	-----------------

0,00<ISP<-0,99	Légèrement sèche	0,00<ISP<0,99	Légèrement humide
-1,00<ISP<-1,49	Modérément sèche	1,00<ISP<1,49	Modérément humide
-1,50<ISP<-1,99	Sévèrement sèche	1,00<ISP<1,99	Fortement humide
ISP<-2,00	Extrêmement sèche	2,00<ISP	Extrêmement humide

Source : McKee *et al.* (1993)

La méthode d'interpolation par krigeage est applicable aux données spatiales qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure de dépendance spatiale des données. Elle estime les valeurs d'une variable (Z) à chaque point de l'espace sur la base des valeurs proches connues, en tenant compte de la valeur de pondération estimée par le variogramme. Sous sa forme de fonction continue, elle caractérise la variance en fonction de la distance entre les paires de points de mesure. Différents types de krigeage existent que sont le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel (Wackernagel, 1993 ; Arnaud & Emery, 2000 ; Hengl *et al.*, 2007). La différence est que le Krigeage simple se base sur des moyennes connues avec estimateur sans biais, par contre, le krigeage ordinaire se base sur des moyennes inconnues avec estimateur. En théorie, le krigeage génère des interpolations spatiales les plus précises. Cette précision dépend de plusieurs facteurs que sont le nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point, la position des échantillons et la distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur (Renard & Comby, 2007). Dans ce travail, la méthode du krigeage simple a été utilisée à partir du logiciel ArcGis 10.8. Le krigeage simple est obtenu par la relation :

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) m \quad (31)$$

Avec Z_v^* : l'estimateur du bloc, Z_i : les variables correspondant au point échantillonné,

λ_i : le poids au point d'échantillonnage et m, la moyenne du champ à estimer.

4.2.1.3. Indices des extrêmes climatiques

Pour analyser les extrêmes climatiques, sur un total de 27 indices, 5 sur les 11 indices de pluie et 3 sur les 16 de température sont retenus pour leur pertinence (Manton *et al.*, 2001 ; Leka *et al.*, 2003 ; New *et al.*, 2006 ; Haylock *et al.*, 2008 ; Aguilar-Saavedra, 2009 ; Hountondji *et al.*, 2011). Ces indices permettent de mettre en relief les événements pluvieux extrêmes, de températures extrêmes, leurs durées et leurs fréquences. En effet, la récurrence des pluies et températures extrêmes est susceptible de créer des dommages aux ouvrages hydrauliques et à l'environnement. L'analyse des

tendances linéaires a été réalisée de 1971 à 2020 par régression linéaire entre les différents indices et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en deux classes indiquant des tendances significatives et non significatives. La limite des deux classes considérées est définie à partir de la statistique de Student utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. La tendance est significative si la probabilité p du test t appliquée à la pente de régression est inférieure à 0,05, alors qu'elle ne l'est pas lorsqu'elle dépasse le seuil de 0,05. L'avantage d'utiliser les indices pour la détection des changements du climat est qu'ils permettent une comparaison facile des tendances entre diverses régions appartenant à des zones climatiques différentes (Tableau VII et VIII).

- Indice Prcptot (total annuel des précipitations)

Soit RR_{ij} la quantité de précipitations quotidiennes le jour i de la période j . Si I représente le nombre de jours j , alors :

$$Prcptot_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (32)$$

- Indice RX1day (Hauteur maximale des précipitations sur 1 jour)

Soit RR_{ij} la quantité de précipitations quotidiennes le jour i de la période j . Alors les valeurs maximales sur 1 jour pour la période j sont :

$$RX1day_j = \max (RR_{ij}) \quad (33)$$

- Indice RX5day (Cumul maximal sur 5 jours)

Soit RR_{kj} la quantité de précipitations pour l'intervalle de 5 jours se terminant par k , de la période j . Les valeurs maximales sur 5 jours pour la période j sont :

$$RX5day_j = \max (RR_{kj}) \quad (34)$$

- Indice R95p (Jours très humides (> 95^e percentile))

Soit RR_{wj} la quantité de précipitations quotidiennes lors d'une journée pluvieuse ($w(RR > 1 \text{ mm})$) dans la période j et soit $RR_{wn}95$ le 95^e percentile des précipitations les jours humides de la période 1961-1990. Si w représente le nombre de jours de pluie dans la période, alors :

$$R95p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ où } RR_{wj} > RR_{wn}95 \quad (35)$$

- Indice Cdd (Jours secs consécutifs)

Soit RR_{ij} la quantité de précipitations quotidiennes le jour i de la période j . Décompte du plus grand nombre de jours consécutifs où :

$$RR_{ij} < 1 \text{ mm} \quad (36)$$

- Indice TXx (Température quotidienne maximale)

Soit Tx_{kj} les températures maximales quotidiennes du mois k et de la période j . La température maximale journalière maximale chaque mois est alors :

$$TXx_{kj} = \max(Tx_{kj}) \quad (37)$$

- Indice TN90p (Pourcentage de nuits climatologiquement chaudes)

Soit Tn_{ij} la température minimale quotidienne du jour i de la période j et soit Tn_m90 le 90^e centile du jour calendaire centré sur une fenêtre de 5 jours (calculé à l'aide de la méthode de l'équation 40 et 41). Le pourcentage de temps est déterminé où :

$$Tn_{ij} > Tn_m90 \quad (38)$$

- Indice Tx90p (Pourcentage de jours climatologiquement chauds)

Soit Tx_{ij} la température maximale quotidienne le jour i de la période j et soit Tx_m90 le 90^e centile du jour calendaire centré sur une fenêtre de 5 jours (calculé à l'aide de la méthode de l'équation 40 et 41). Le pourcentage de temps est déterminé lorsque :

$$Tx_{ij} > Tx_m90 \quad (39)$$

- Estimation empirique des quantiles :

Le quantile d'une distribution est défini comme

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \inf\{x : F(x) \geq p\}, 0 < p < 1 \quad (40)$$

où $F(x)$ est la fonction de distribution, $\inf$: l'infimum (la plus petite valeur de x qui satisfait la condition), p : niveau de percentile pour définir un seuil de jour ou nuit extrême.

.

Soit $\{X_{(1)}, \dots, X_{(n)}\}$ les statistiques d'ordre de $\{X_1, \dots, X_n\}$ (c'est-à-dire les valeurs triées de $\{X\}$), et notons $Q_i(p)$ la définition du i ème quantile de l'échantillon. Les quantiles d'échantillon peuvent généralement être écrits sous la forme :

$$Q_i(p) = (1 - \gamma)X_{(i)} + \gamma X_{(i+j)} \quad (41)$$

Avec γ : paramètre utilisé pour ajuster la forme de la distribution dans le calcul des seuils de percentiles.

Dans cette étude, les indices des extrêmes climatiques ont été calculés uniquement pour les trois stations synoptiques du bassin versant du Sassandra. Cette approche repose sur des considérations méthodologiques solides. Les indices utilisés sont définis par l'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) et implémentés dans le logiciel RClimDex, nécessitant des séries quotidiennes complètes de températures maximales, minimales et de précipitations pour garantir des résultats cohérents et comparables (Zhang & Yang, 2017). Les postes pluviométriques ne mesurant que la précipitation ne permettent pas de calculer les indices liés à la température, ce qui rendrait une analyse homogène des paramètres impossible. L'objectif principal est de quantifier les tendances temporelles des indices, et non de produire des cartographies climatiques à l'échelle spatiale. En effet, la création de cartes à partir d'un réseau aussi peu dense de points d'observation entraînerait des interpolations très incertaines, susceptibles d'introduire des biais statistiques importants, car les données ponctuelles ne suffisent pas à représenter de manière fiable les structures spatiales, en particulier en présence de variabilité topographique ou climatique (Ossa-Moreno *et al.*, 2019). Cette même problématique est soulignée en climatologie, où l'interpolation à faible densité de stations donne des surfaces climatiques lissées et potentiellement éloignées des réalités locales, ce qui peut conduire à des résultats biaisés ou trompeurs lorsqu'on cherche à caractériser précisément les extrêmes (Ossa-Moreno *et al.*, 2019).

De nombreuses études régionales montrent que l'analyse des tendances peut être menée de manière robuste même avec un nombre limité de stations, à condition que celles-ci soient représentatives des zones d'étude et disposent de séries de données continues et fiables (Zhang & Yang, 2017). Enfin, pour assurer une comparabilité parfaite des paramètres entre les stations, chaque point de mesure doit fournir le même ensemble de variables. L'inclusion de postes pluviométriques isolés, ne mesurant que la précipitation, compromettrait l'homogénéité et pourrait introduire des biais dans l'analyse statistique des tendances (RClimDex User Guide). Ainsi, l'étude repose sur des séries cohérentes, complètes et représentatives, permettant de quantifier de manière fiable les changements des extrêmes climatiques dans le temps sans recourir à des cartographies spatialement biaisées.

Tableau VII : Indices des extrêmes des précipitations journalières

Indice	Unité	Définition	Rôle	Impact sur le barrage de Buyo
PRCPTOT	mm	Cumul annuel total des précipitations des jours humides (jours >1 mm).	Évalue la tendance générale des précipitations annuelles et la disponibilité en eau.	Niveau du réservoir : une baisse du PRCPTOT signifie moins d'eau stockée, implique, réduction de la production hydroélectrique.
RX1day	mm	Hauteur maximale des précipitations en un jour.	Évalue l'occurrence des pluies extrêmes d'un jour.	Risque de crues soudaines : fortes pluies journalières peuvent provoquer des déversements rapides, tension sur les vannes et risque d'inondation en aval.
RX5day	mm	Précipitation totale maximale sur 5 jours consécutifs pluvieux dans l'année.	Évalue l'occurrence des pluies intenses prolongées.	Crues prolongées : surcharge du barrage, nécessité d'ouvrir les vannes progressivement, risque d'érosion des berges et des infrastructures.
R95p	Jour	Nombre de jours avec un cumul journalier supérieur au 95 ^e centile des précipitations des jours humides.	Indique la fréquence des journées très pluvieuses.	Surveillance des périodes à fortes pluies : permet d'anticiper les risques de crue répétée et de gérer le stockage d'eau.
CDD	Jour	Nombre maximum de jours consécutifs avec RR < 1 mm pour chaque année.	Évalue la durée et la fréquence des sécheresses.	Risque de sécheresse hydrologique : baisse du niveau du réservoir, augmentation de l'évaporation relative, diminution de la production hydroélectrique et du potentiel d'irrigation.

Tableau VIII : Indices des extrêmes des températures journalières

Indice	Unité	Définition	Rôle	Impact sur le barrage de Buyo
TXx	°C	Température quotidienne maximale : valeur maximale mensuelle de la température maximale quotidienne.	Évalue les tendances des températures extrêmes diurnes.	Augmentation de l'évaporation du réservoir, implique, baisse du niveau d'eau, implique, diminution de la production hydroélectrique et de l'approvisionnement en eau pour irrigation et consommation.
TN90p	Jour	Nombre de nuits où la température dépasse le 90 ^e centile de la distribution climatique des nuits.	Évalue le réchauffement des nuits (nuit trop chaude).	Accroît l'évaporation nocturne et le stress thermique sur l'écosystème aquatique du réservoir.
TX90p	Jour	Nombre de jours où la température dépasse le 90 ^e centile de la distribution climatique des jours.	Évalue le réchauffement des jours (journées très chaudes).	Accélère l'évaporation diurne, augmente la demande en eau et peut affecter la gestion énergétique du barrage (augmentation du refroidissement si usages industriels).

4.2.2. Caractérisation de la variabilité hydrologique

Vu la forte variabilité pluviométrique que subit la zone Ouest-Africaine, il est crucial de montrer son incidence sur la variabilité hydrologique à travers une analyse des indices de caractérisation de la sécheresse hydrologique. Ces indices sont : l'Indice Hydrologique Normalisé (IHN), l'Indice de Sécheresse des Débits (ISD) et l'Indice du Logarithme Décimal des déviations hydrologiques (ILDH). L'IHN permet de comparer les sécheresses entre stations et périodes en standardisant les débits, mais il reste sensible aux valeurs extrêmes et suppose une distribution proche de la normale. L'ISD met en évidence les déficits de débit absolus de façon simple et intuitive, mais ne prend pas en compte la variabilité relative entre stations ou saisons. L'ILDH réduit l'influence des valeurs extrêmes et stabilise la variance grâce à une transformation logarithmique, ce qui le rend adapté aux régions à forte variabilité hydrologique, bien que son interprétation soit moins directe. Les normales et les décennales hydrologiques pourront également être analysées. Ces analyses porteront sur les normales 1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020, d'une part, et par la moyenne glissante de 10 ans, d'autre part.

4.2.2.1. Indice Hydrologique Normalisé (IHN)

L'indice hydrologique normalisé (IHN) est analogue à l'indice standardisé des précipitations (Mckee *et al.*, 1993). Il est développé pour quantifier le déficit hydrologique à des échelles de temps multiples (Sharma & Panu, 2010). Cet indice est exprimé mathématiquement à travers l'équation (42) :

$$INH_i = \frac{(D_i - D_m)}{S} \quad (42)$$

avec : D_i : débit du mois ou de l'année i en m^3/s ; D_m : débit moyen (m^3/s) de la série sur l'échelle temporelle considérée ; S : écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Il permet également de distinguer les mois et années secs (déficitaires) des mois et années humides (excédentaires). Une sécheresse sévit lorsque l'IHN est consécutivement négatif et se termine lorsque l'IHN devient positif. Une classification de la sécheresse hydrologique suivant les valeurs de l'IHN est donnée au Tableau IX.

Tableau IX : Classification des séquences de sécheresse hydrologique selon l'IHN

Valeur de l'IHN	Séquence de sécheresse	Valeur de l'IHN	Séquence humide
0,00<IHN<-0,99	Légèrement sèche	0,00<IHN<0,99	Légèrement humide
-1,00<IHN<-1,49	Modérément sèche	1,00<IHN<1,49	Modérément humide
-1,50<IHN<-1,99	Sévèrement sèche	1,50<IHN<1,99	Fortement humide
IHN<-2,00	Extrêmement sèche	2,00<IHN	Extrêmement humide

Source : McKee *et al.* (1993)**4.2.2.2. Indice de Sécheresse des Débits (ISD)**

L'indice de sécheresse des débits (ISD) est un indicateur hydrologique qui permet d'évaluer la gravité et la fréquence des périodes de faible écoulement dans un bassin versant. Il est analogue à l'indice de Bhalme & Mooley (1979), qui quantifie le pourcentage d'écart des précipitations par rapport à la moyenne à long terme. De manière similaire, l'ISD compare les débits observés à la valeur moyenne historique du débit pour la période considérée. Un ISD négatif indique un déficit par rapport à la moyenne, traduisant des conditions de sécheresse, tandis qu'un ISD positif reflète un excédent d'eau ou des conditions plus humides que la normale. L'indice permet ainsi de suivre la variabilité interannuelle et saisonnière des débits et d'identifier les périodes critiques pour la gestion de l'eau et les activités dépendantes du débit, telles que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable ou l'hydroélectricité. L'ISD encore appelé l'écart moyen du débit (EMD) est utilisé pour déterminer la réaction d'un fleuve face au déficit pluviométrique (Nalbantis & Tsakiris, 2009). Selon Mahé & Olivry (1995), il permet également de déterminer les déficits et la variation du débit (équation 43).

$$ISD_i = \frac{D_i}{D_m} - 1 \quad (43)$$

avec : D_i : débit du mois ou de l'année i en m^3/s ; D_m : le débit moyen (m^3/s) de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Cette méthode consiste à mettre en relief les périodes durant lesquelles les apports d'eau du bassin sont significativement inférieurs par rapport à l'apport moyen mensuel. Par rapport à la classification de cet indice, si l'ISD est supérieur à 1, la période est humide ; si l'ISD est égal à 0, la période est moyennement normale et si l'ISD est inférieur à 0, la période est sèche.

4.2.2.3. Indice logarithme décimal des déviations hydrologiques ILDH

Le pourcentage des débits représente la plus simple des méthodes employées pour exprimer le déficit hydrologique d'une période par le rapport aux débits effectifs et la moyenne pluriannuelle pour cette période (Stângă, 2009). L'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH) est calculé de la manière suivante (équation 44) :

$$ILDH_i = \log \left(\frac{D_i}{D_m} \right) \quad (44)$$

avec : D_i : débit du mois ou de l'année i en m^3/s ; D_m : le débit moyen (m^3/s) de la série sur l'échelle temporelle considérée.

L'ILDH met mieux en évidence l'excédent ou le déficit hydrologique. Une classification de la sécheresse suivant les valeurs de l'ILDH est donnée au Tableau X.

Tableau X : Classification des séquences de sécheresse selon l'ILDH

Valeur de l'ILDH	Séquence de sécheresse	Valeur de l'ISP	Séquence humide
$0,00 < ISP < -0,99$	Modérément sèche	$0,00 < ISP < 0,99$	Modérément humide
$-1,00 < ISP < -1,99$	Fortement sèche	$1,00 < ISP < 1,99$	Fortement humide
$ISP < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < ISP$	Extrêmement humide

Source : Stângă (2009)

4.2.2.4. Intensité, Durée, fréquence des séquences sèches

Pour étudier la sécheresse, il est important de caractériser sa durée, son intensité et sa fréquence.

- **Durée maximale des séquences de sécheresse**

La durée maximale de sécheresse (D) est une caractéristique importante qui est choisie pour caractériser la durée des séquences sèches (Faye *et al.*, 2017). Le calcul de la durée se fait comme suit (équation 45) :

$$D = (A_{fin} - A_{début}) + 1 \quad (45)$$

Avec : A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ; $A_{début}$: Année du début de la période sèche

- **Intensité des séquences de sécheresse**

L'intensité est généralement évaluée par des indices normalisés. Dans cette étude, il s'agit de l'indice hydrologique normalisé (IHN), l'indice de sécheresse des débits (ISD) et l'indice du logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH), développés à la section précédente.

- **Fréquence des séquences de sécheresse**

La fréquence cumulée de sécheresse (F) donne une idée de l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude donnée (Faye *et al.*, 2017). Elle est obtenue par l'équation 46 :

$$F = \frac{f_n}{N} \quad (46)$$

Avec : f_n : effectif cumulé des séquences sèches ; N : effectif total de la série étudiée.

4.3. Caractérisation de la variabilité climatique future

La caractérisation du climat futur est faite en déterminant les changements attendus des paramètres tels que la température et les précipitations aux horizons 2030 et 2050 par rapport à la période historique (1981-2005). L'approche méthodologique part du choix des modèles climatiques régionaux. Deux méthodes complémentaires pourront être utilisées, à savoir le diagramme de Taylor et la comparaison des régimes saisonniers de températures et de précipitations entre les observations et les modèles.

4.3.1. Choix de modèle

Pour choisir un modèle climatique, il convient d'utiliser des tests statistiques mais également le profil pluviométrique observé à la station concernée. La méthode se base sur le diagramme de Taylor, un outil statistique et d'analyse des profils saisonniers observés aux stations synoptiques.

4.3.1.1. Diagramme de Taylor

L'étape initiale de l'utilisation des modèles climatiques pour l'évaluation des impacts du changement climatique est de vérifier leur aptitude à reproduire le climat de la zone d'étude (Taylor, 2001). Pour cela, le diagramme de Taylor est appliqué aux séries mensuelles standardisées de températures et de précipitations. C'est un diagramme bidimensionnel qui permet de déterminer le lien entre les données observées et simulées à travers : la corrélation (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type. L'analyse du diagramme de Taylor fournit un résumé statistique concis des relations entre les sorties de modèles et les données observées en termes de :

- corrélation (R) entre les valeurs prédites et les valeurs observées ;

$$R = \frac{Cov(O_i, S_i)}{\delta O_i \times \delta S_i} \quad (47)$$

Avec $Cov(O_i, S_i)$: covariance des valeurs observées et simulées ; δO_i et δS_i : écarts types des valeurs observées et simulées.

- Root Mean Square Error (RMSE) pour quantifier la différence entre la simulation et l'observation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (48)$$

Avec S_i et O_i correspondant respectivement aux valeurs simulées et observées de la variable ;
N : le nombre de couple de données à comparer.

- et erreur absolue moyen ou AAE (Average Absolut Error) ;

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{N} \quad (49)$$

Avec S_i et O_i désignant respectivement les valeurs simulées et observées de la variable ; N désigne le nombre de couple de données à comparer.

Les résultats des simulations sont considérés comme bons lorsque le R est proche de 1 et que le RMSE et l'AAE indiquent une valeur faible (avoisinant 0). En d'autres termes, plus R est élevé, RMSE et le rapport des écarts types entre le modèle et l'observation sont faibles plus le modèle reproduit mieux le régime saisonnier du paramètre climatique.

4.3.1.2. Saisonnalité des modèles et des observations

Le régime saisonnier de la température moyenne et des précipitations est représenté sur la période d'observation (1981-2005). Pour chaque paramètre, le régime saisonnier de 10 modèles climatiques régionaux et celui des observations sont représentés sur le même graphique pour appréhender le modèle qui reproduit au mieux la variabilité saisonnière des observations.

4.3.2. Évaluation des changements climatiques futurs

4.3.2.1. Correction des sorties de modèles climatiques

Rappelons que les données de sortie de modèle climatique sont généralement biaisées. Ainsi, avant de les utiliser, elles devront être corrigées. La correction est faite à l'aide de l'outil CMhyd qui

dispose de huit méthodes de correction de biais différentes que sont : la méthode du linear scaling (multiplicative and additive), la méthode du delta change correction (multiplicative and additive), la méthode du precipitation local intensity scaling, la méthode du power transformation of precipitation, la méthode du variance scaling of temperature, et la méthode de distribution mapping of precipitation and temperature. Pour cette étude, la méthode de distribution mapping des précipitations et de la température est utilisée. Zhang *et al.* (2018) notent que la cartographie de distribution est la plus performante après avoir utilisé cinq méthodes de correction des biais. Cette méthode de correction de biais corrige la fonction de distribution des valeurs MCR simulées pour se conformer à la fonction de distribution observée (Teutschbein & Seibert, 2012). L'occurrence de la distribution des précipitations et de la température est décalée à l'aide de la fonction de transfert des données simulées de la MCR basé sur la valeur moyenne mensuelle (Sennikovs & Bethers, 2009; Zhang *et al.*, 2018). Pour les événements pluvieux, la distribution Gamma développée par Thom (1958) avec des paramètres de forme " α " et " β " sont notés comme étant plus appropriés. La distribution Gamma est utilisée dans plusieurs études (Katz, 1999 ; Watterson & Dix, 2003; Block *et al.*, 2009; Piani *et al.*, 2010) et s'est avérée plus adaptée aux études d'analyse des précipitations. Le modèle peut être représenté mathématiquement par l'équation 50 :

$$f_Y(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (50)$$

$x \geq 0$; $\alpha, \beta > 0$ où Γ est la fonction Gamma ; et α et β sont respectivement les paramètres de forme et d'échelle.

La distribution gaussienne avec le paramètre " μ " et le paramètre d'échelle " σ " s'est avérée être le meilleur ajustement pour les événements de température. Ceci est confirmé par plusieurs études en utilisant la distribution (Schoenau & Kehrig, 1990 ; Bisht *et al.*, 2020).

4.3.2.2. Estimation des potentiels changements attendus

Pour mieux comprendre les changements du climat futur, la quantification des variations futures du cumul annuel des précipitations et des températures moyennes annuelles est faite au niveau de chaque station et cela pour les deux scénarii de changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les déviations du cumul annuel des précipitations sont standardisées par rapport à la moyenne de la période de contrôle (1981-2005) et sont exprimées en pourcentage pour la pluviométrie et en degré Celsius pour la température.

- Pour les précipitations moyennes annuelles, la formule suivante a été appliquée :

$$Déviation_i = \frac{Cum_i - Cum_{CTRL}}{Cum_{CTRL}} * 100 \quad (51)$$

Avec Cum_i : cumul annuel des précipitations de l'année i ; Cum_{CTRL} : cumul annuel moyen des précipitations sur la période de contrôle (1981-2005).

- Pour les températures moyennes annuelles, la formule suivante est appliquée :

$$Déviation_i = T_{moy\ i} - T_{moy\ CTRL} \quad (52)$$

Avec $T_{moy\ i}$: température moyenne annuelle de l'année i ;

Ces déviations représentent la diminution ou l'augmentation relative des précipitations ou des températures annuelles pour le futur (horizon 2030 et 2050) comparée à la période de référence (1981-2005).

4.3.3. Évaluation des impacts des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant

Les variations climatiques ont de fortes répercussions sur les ressources en eau (Badin, 2004). La mise en évidence dans la réponse hydrologique du bassin versant est rendue possible à l'aide de modèles hydrologiques. Pour ce faire, il est possible d'intégrer les données de sorties de modèles climatiques au sein des modèles hydrologiques en supposant que ces données sont de qualité. Les débits futurs sont obtenus par simulation après avoir testé, calé et validé le modèle hydrologique. Pour ce faire, les données des stations hydrométriques de Piébli et de Kahin sont utilisées comme données d'observation.

4.3.3.1. Modélisation hydrologique du bassin versant

Le modèle GR4J est un modèle hydrologique utilisé pour calculer les débits à partir des précipitations et de l'évapotranspiration (Perrin *et al.*, 2003). Il est simple, avec seulement quatre paramètres, ce qui limite les situations où plusieurs combinaisons de paramètres donnent les mêmes résultats (phénomène appelé équifinalité) (Perrin *et al.*, 2001). Ce modèle est adapté au bassin du Sassandra à Buyo, où les données sont limitées et les précipitations très variables. Il utilise uniquement les précipitations, l'évapotranspiration et les débits observés pour le calage, ce qui le rend pratique et fiable pour les zones tropicales. GR4J est également robuste pour les simulations

dans des conditions de changement climatique, ce qui justifie son choix pour cette étude (Vaze *et al.*, 2010).

Les étapes de la modélisation de l'impact du changement climatique sur le comportement hydrologique du fleuve Sassandra à Buyo sont les suivantes :

1. détermination de la pluie moyenne et de l'ETP moyenne journalière (observées et simulées) par la méthode du polygone de Thiessen ;
2. calage et validation du modèle conceptuel GR4J avec les données observées ;
3. utilisation des sorties futures (précipitations et ETP) issus de la base de données CORDEX-Afrique ;
4. simulation des écoulements à l'aide du modèle conceptuel GR4J à partir des paramètres et détermination des impacts.

Il faut préciser que les sorties des modèles utilisées concernent la moyenne multi-modèle de sorties des modèles qui présentent de bonnes performances sur la zone d'étude. Les projections peuvent varier d'un modèle climatique à l'autre en raison des différentes façons de représenter les processus du système terrestre. Toutefois, il a été démontré dans la littérature scientifique récente que l'utilisation d'une méthode faisant intervenir des ensembles multi-modèles permettrait vraisemblablement d'obtenir de meilleurs résultats en matière de projection des changements climatiques (Nikulin *et al.*, 2012).

4.3.3.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant

Les auteurs tels que Oudin *et al.* (2005) ; Oudin (2006) ont évalué 27 formulations d'évapotranspiration potentielle (ETP) pour des applications de modélisation pluie-débit. Ces études ont conduit à la mise au point d'une formule d'ETP simple et efficace permettant d'obtenir de meilleurs résultats que l'ensemble des formulations testées, en termes de restitution des débits. La formulation est détaillée par Oudin *et al.* (2005). Elle utilise comme seule donnée d'entrée la température. Elle utilise également le calcul de la radiation extraterrestre (Morton, 1983). Ce programme est disponible au format Excel consultable sur le site : <https://webgr.inrae.fr/modeles/modele-devapotranspiration/>.

La formule est la suivante :

$$PE = \frac{Re}{\lambda_p} \frac{Ta+5}{100} \quad \text{si } Ta + 5 > 0, \quad (53)$$

$$\text{sinon } PE = 0 \quad (54)$$

Où PE est le taux d'évapotranspiration potentielle (mm/jour), R_e le rayonnement extraterrestre ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{jour}$), λ_p le flux de chaleur latente selon la masse volumique de l'eau (MJ/kg) et T_e la température moyenne journalière ($^\circ\text{C}$).

4.3.3.3. Estimation de la pluviométrie moyenne et de l'ETP moyenne

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la pluie moyenne sur un bassin versant. La méthode des polygones de Thiessen retient notre attention pour sa simplicité et les bons résultats qu'elle donne (Kouakou, 2011).

- **Polygones de Thiessen**

La plus couramment utilisée, la méthode des polygones de Thiessen (Figure 14) consiste à partitionner l'espace géographique, en définissant pour chaque station pluviométrique P_i , un polygone d'influence de telle façon que chaque point du polygone soit plus proche de la station P_i que de toute autre station. Ces polygones dépendent uniquement de la configuration géométrique et non pas des valeurs observées. Ils sont obtenus en traçant les médiatrices des segments joignant la station P_i aux stations voisines.

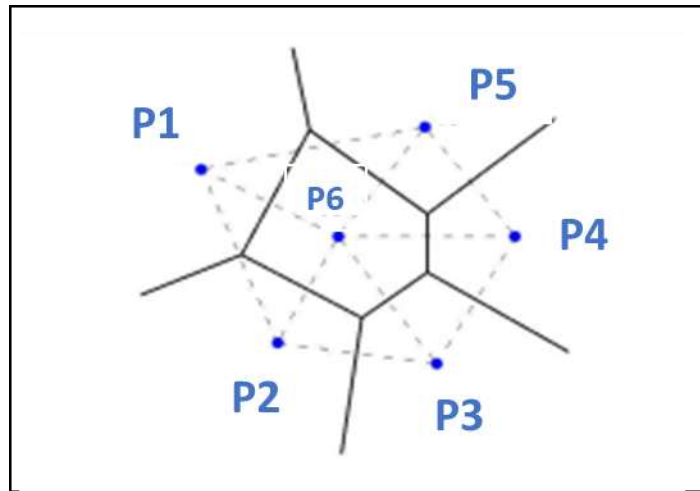


Figure 14 : Schéma explicatif du principe des polygones de Thiessen

La pluie moyenne par la méthode des polygones de Thiessen sur un bassin est obtenue par la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times S_i)}{S_T} \quad (55)$$

Avec : P_{moy} : Pluie moyenne ou quantité d'ETP moyenne sur le bassin ; P_i : Hauteurs de pluie ou quantité d'ETP mesurée dans les stations ; S_i : Surface de chaque polygone ; S_T : Surface totale du bassin versant ; n : Nombre de stations.

4.3.3.4. Calage et validation du modèle hydrologique

Les données utilisées sont les débits moyens journaliers, la pluie journalière et l'ETP journalière. La série temporelle a été divisée en deux sous échantillons, le premier est utilisé pour caler le modèle en estimant ses paramètres, et le deuxième pour sa validation. Une calibration semi-automatique a été faite pour le calage, en procédant par tâtonnements, ensuite l'utilisation du solveur d'Excel. La procédure de calage consiste à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères d'efficacité sur la période de calage. Les paramètres retenus sont ceux pour lesquels les critères d'efficacité sont optimaux pour les périodes de calage et de validation. La validation du modèle vise à vérifier si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence non utilisées lors du calage. La qualité du modèle se mesure à la valeur du critère de Nash. L'objectif est de chercher à améliorer les valeurs des critères de qualité traduisant les performances des simulations. Seules les données pluviométriques et d'évapotranspirations potentielles sont utilisées comme données d'entrée du modèle GR4J (Abdelkader *et al.*, 2019). Le calcul est lancé en prenant pour paramètres du modèle les valeurs optimisées lors du calage. Les valeurs des débits issues du modèle sont alors comparées aux valeurs observées par corrélation linéaire simple et au moyen du critère de Nash. Le calage et la validation ont été respectivement effectués sur les périodes 1985-1989 et 1977-1982 soit cinq (5) ans de calage sur une période comportant les débits enregistrés et six (6) ans de validation sur une période comportant des débits manquants. Pour chaque test, la période de mise en route a été fixée à 365 jours, soit un (1) an de mise en route du modèle. A la fin, des tests de calage et de validation du modèle GR4J sont effectués.

4.3.3.5. Évaluation des impacts des changements climatiques sur les écoulements

Dans cette section, la démarche consiste à évaluer les impacts possibles des changements climatiques à l'échelle mensuelle et annuelle. L'analyse est faite à partir des données hydrométriques obtenues par la simulation du modèle GR4J aux horizons définis.

A l'échelle mensuelle, l'évaluation des éventuels impacts des changements climatiques futurs aux horizons 2030 et 2050 a consisté à les comparer à celles de la période de référence des débits (1981-

2010). L'objectif est de vérifier si les variations mensuelles de température et de précipitations induites par les changements climatiques s'accompagnent de modifications des régimes hydrologiques. Les moyennes mensuelles de la période de référence sont comparées aux moyennes des débits simulés fonction par scénario.

A l'échelle annuelle, la même opération est effectuée aux mêmes horizons. Ainsi, les taux de variations des débits annuels sont déterminés pour vérifier s'il existe des déficits ou des excédents d'écoulements importants.

4.4. Impacts de la variabilité climatique sur la production de l'électricité

L'objectif de cette partie du travail est de déterminer l'influence réelle des paramètres hydro-climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique au barrage de Buyo. Les niveaux d'eau dans la retenue constituent un indicateur de la capacité du barrage à produire de l'électricité. Son suivi est donc une activité stratégique pour la production et la gestion de l'électricité. L'analyse va porter sur la variation du niveau d'eau qui est le paramètre clé pour le turbinage. Il s'agit, d'une part, d'identifier les années de sécheresse et les phénomènes météorologiques associés et d'analyser la correspondance entre ces années et les années où la lame d'eau utile est inférieure au seuil critique. D'autre part, de faire des projections en se basant uniquement que sur les paramètres météorologiques dont la pluie et la température simulées, les données futures de niveau d'eau du barrage ou cote n'étant pas disponibles, faute d'outils adéquats pour leur simulation.

4.4.1. Détermination de la lame d'eau utile

La lame d'eau utile (**Leu**) est la différence entre la côte journalière (**Hj**) et la côte minimale de production (**Côte min**). Cette lame d'eau permet d'analyser la disponibilité de l'eau pour le turbinage. Elle est exprimée en mètre (m) car elle représente la hauteur d'eau utilisée.

$$Leu = Hj - Côte\ min \quad (56)$$

Lorsque : $Leu > 0$

Dans ce cas, le barrage contient de l'eau excédentaire qui peut être utilisée pour répondre aux besoins de production d'électricité.

Lorsque : $Leu < 0$

Le barrage ne contient pas dans ce cas, suffisamment d'eau pour répondre aux besoins de production. Cela peut entraîner des périodes de délestage.

4.4.2. Classification du niveau de vigilance sur l'évolution temporelle de la lame d'eau

La première étape consiste à collecter des données climatiques et hydrologiques fiables et complètes. Cette collecte inclut des informations sur les précipitations, les températures, les débits entrants dans le barrage, les données de lame d'eau utile, les volumes d'eau des barrages et d'autres variables pertinentes. L'acquisition de données est fondamentale pour la qualité des analyses sur la lame d'eau utile pour turbiner.

L'indice de lame d'eau efficace L_{eff} est défini pour suivre le niveau d'alerte de la lame d'eau dans le réservoir.

$$L_{eff} = \frac{Leu}{Côte\ max - Côte\ min} \quad (57)$$

Avec : côte max : la hauteur d'eau maximale que le barrage peut stocker pour son fonctionnement, côte min : la hauteur la plus basse en dessous de laquelle il est demandé de ne pas turbiner.

La différence entre la côte max et la côte min est la lame d'eau optimum.

Cet indice varie de 0 à 1. Il est zéro (0), lorsque la lame d'eau est nulle et 1 lorsque la lame d'eau est optimum.

La classification de cet indice par la méthode des quintiles, montre le niveau d'alerte pour la production (Tableau XI).

Tableau XI : Classification des niveaux de vigilance

Valeur de l'indice	Niveau de vigilance
0 – 0,20	Crise
0,20 - 0,40	Alerte
0,40 - 0,60	Pré-alerte
0,60 - 0,80	Vigilance
0,80 - 1	Confort

Le suivi de cet indice permet non seulement de suivre le niveau de vigilance, mais également de déterminer les différentes périodes associées au cours de l'année. Cette classification n'est pas présente dans la littérature scientifique. Elle est inspirée de la méthode de McKee *et al.* (1993) avec les indices ISP. Dans sa mise œuvre, elles seront des lignes horizontales pour traduire les différents niveaux de vigilance. Ces lignes horizontales ou lames d'eau efficace sont classées de "Confort" à "Crise". Ces repères sont essentiels pour évaluer l'état de la ressource en eau au fil du temps.

4.4.3. Projection climatique et scénario d'évolution de la lame d'eau

Pour mettre en lien les paramètres climatiques futurs et les paramètres hydrologiques de production de l'énergie hydroélectrique, la moyenne multi-modèle des trois modèles NCC, ICHEC et IPSL est utilisée. Ainsi, les données extraites de la base de données du GIEC portant sur les deux scénarii RCP4.5 et RCP8.5 ont servi de support.

L'approche méthodologique a consisté à utiliser les valeurs de l'Indice Standardisé de Précipitation sur la période d'observation. Ainsi, les années de déficit pluviométrique, d'une part, et les années où le phénomène EL-Nino a sévit, d'autre part, sont identifiées. Sur cette base, une correspondance est faite des années de déficit pluviométrique couplé à l'apparition du phénomène avec les années de déficit hydrologique pour dégager les similitudes avérées.

Ainsi, pour dégager l'impact futur du climat sur la production de l'énergie hydroélectrique, par une approche analogique, les variations des lames de production sont déduites du comportement de la pluviométrie future.

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de présenter les différentes approches méthodologiques utilisées dans cette étude. Il s'agissait d'abord de caractériser la méthodologie de la variabilité hydro-climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo à l'aide des normales pluviométriques et hydrologiques, des décennales pluviométriques et hydrologiques indices standardisés de précipitation (SPI), des indices des extrêmes des précipitations et des températures, des indices hydrologiques INH, ISD et IDLH. Ensuite, la modélisation du climat futur à travers le choix de modèles climatiques régionaux et la correction des biais ont été présentées. De plus, la modélisation des écoulements historiques et futurs à l'aide du modèle hydrologique conceptuel GR4J sur la base des deux scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5 a été présentée. Enfin, la méthodologie de l'évaluation de l'impact des changements du climat sur la production de l'énergie hydraulique a été décrite.

Toutes ces méthodologies décrites, conduiront aux résultats et à leurs discussions qui feront l'objet des chapitres suivants.

PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 5 : Caractérisation hydro-climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo**Introduction partielle**

Ce chapitre présente et discute les résultats relatifs à la variabilité climatique et hydrologique du bassin versant du fleuve Sassandra. La variabilité climatique est analysée à travers les normales pluviométriques, leurs évolutions sur différentes périodes de référence, les tendances décennales et le calcul d'indices climatiques permettant de caractériser les extrêmes et anomalies. La variabilité hydrologique est étudiée en comblant les éventuelles lacunes des séries de débits, puis en examinant les normales et tendances décennales des écoulements, ainsi que les indices hydrologiques associés. L'ensemble de ces analyses fournit une compréhension approfondie des interactions entre climat et hydrologie et permet d'évaluer leurs implications sur le fonctionnement du barrage de Buyo et la gestion des ressources en eau du bassin.

5.1. Variabilité climatique

Les résultats de la caractérisation de la variabilité pluviométrique sont présentés dans les sections suivantes. La caractérisation de la pluviométrie s'est appuyée sur l'analyse des normales, pluviométriques, des décennales pluviométriques et des indices SPI.

5.1.1. Analyse spatiale des normales pluviométriques

L'analyse spatiale des normales pluviométriques (Figure 15) montre d'une part que, le Nord du bassin enregistre de faibles hauteurs de pluie par rapport au Sud-Ouest du bassin, et d'autre part, une régression des hauteurs de pluie sur l'ensemble bassin versant est observable de la première décennie à la dernière. Cette régression est marquée par une baisse de la pluie de 1900 mm à 1100 mm. On observe également que la normale 1971-2000 (Figure 15) est plus arrosée que les deux autres normales avec des hauteurs de pluie qui atteignent les 1900 mm. Le constat est que la pluie baisse de la normale 1971-2000, à la normale 1981-2010 et à la normale 1991-2020 sur l'ensemble bassin pour atteindre les 1700 mm.

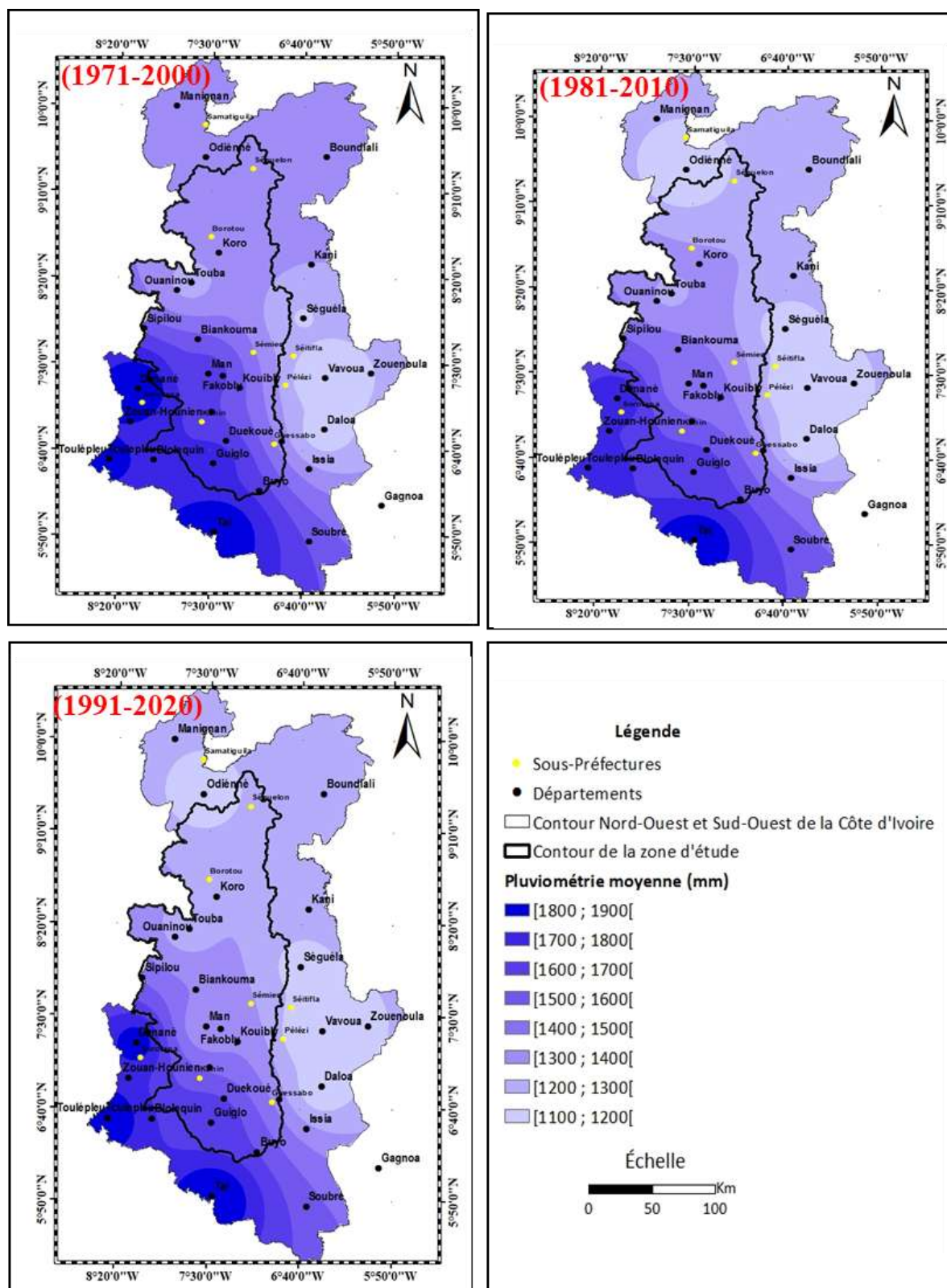


Figure 15 : Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des normales

5.1.2. Analyse des variations des normales pluviométriques 1971-2000 et 1991-2020 par rapport à la normale 1981-2010

La figure 16 présente les variations des cumuls des précipitations enregistrés au cours des décennies 1971-2000 et 1991-2020 sur le bassin versant par rapport à la normale 1981-2010.

Une situation pluviométrique normale est observée suivant la normale 1991-2020. Dans l'ensemble, la normale 1971-2000 présente une situation pluviométrique stable. En effet, les précipitations enregistrées sont supérieures à celles de la normale 1981-2010. Les écarts sont dans l'ordre positif et atteignent 15% au Nord et au Centre du bassin. La normale 1991-2020 présente une situation pluviométrique normale sur tout le bassin versant. Les écarts sont compris entre 0 et 5% à l'exception de la zone de Man, où les écarts atteignent parfois les - 4%.

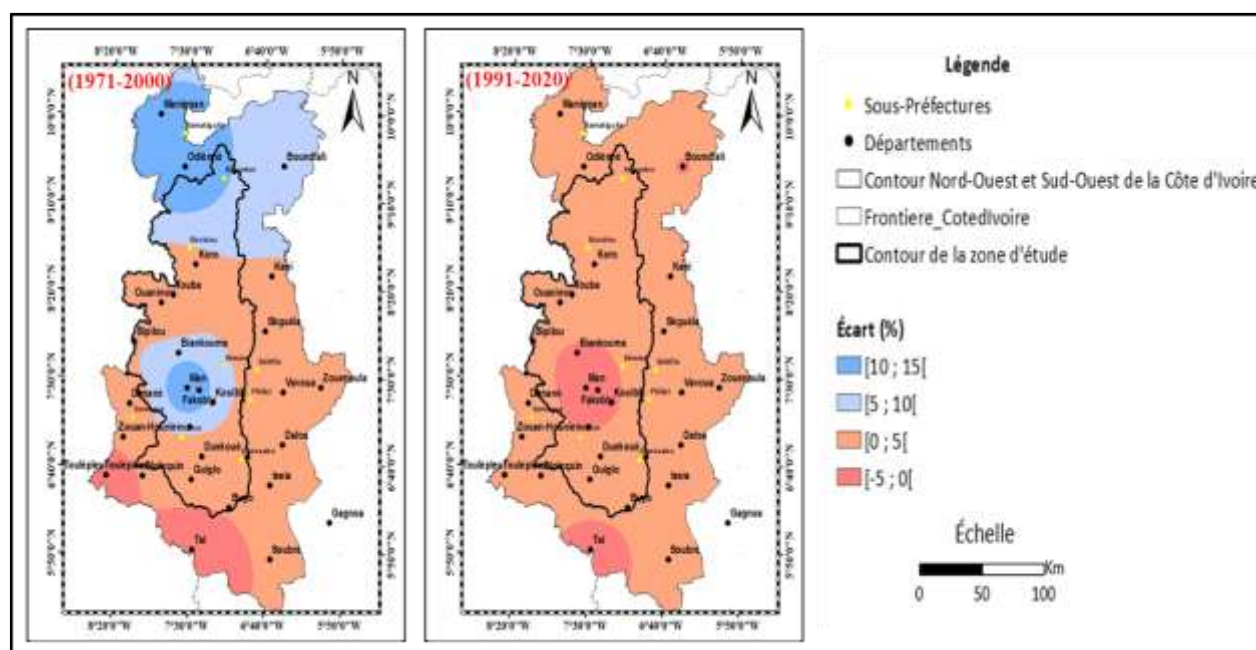


Figure 16 : Écart de la moyenne des normales 1971-2000 et 1991-2020 par rapport à la normale 1981-2010

5.1.3. Décennales pluviométriques

Les résultats exposés présentent la situation pluviométrique générale du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo et portent sur trois points essentiels. Le premier point évoque la répartition de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin. Le second présente les écarts des moyennes pluviométriques décennales par rapport à la normale 1981-2010. Le dernier point présente les résultats de la pluviométrie saisonnière de chaque décennie.

- **Analyse spatiale des décennales pluviométriques**

La figure 17 présente respectivement l'évolution de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des décennies 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 et 2011-2020.

L'analyse de la figure 17 montre que la zone centrale du bassin versant enregistre des hauteurs de pluies variantes entre 1000 et 1500 mm au cours des cinq dernières décennies. Par contre, la partie Nord et la partie Sud-Ouest enregistrent des hauteurs au-dessus des 1700 mm. Ces hauteurs de pluie varient dans la tranche de 1700 mm à 2100 mm par an. L'analyse révèle que le bassin est plus arrosé au nord qu'au centre, et légèrement plus qu'au sud. L'observation générale fait état de la baisse de la pluie entre les décennies 1971-1980 et 1981-1990. Cette baisse est estimée à 3%. Une hausse de 3% est également observée entre les décennies 1981-1990 et 1991-2000 avant une forte chute à la décennie 2001-2010 de 9% par rapport à la décennie 1991-2000. Une remontée relativement forte de 12% à la décennie 2011-2020 est observée par rapport à la décennie 2001-2010. Il apparaît que la décennie 1971-2000 est la plus arrosée d'où excédentaire de la série, tandis que la décennie 2001-2010 est la moins arrosée d'où déficitaire.

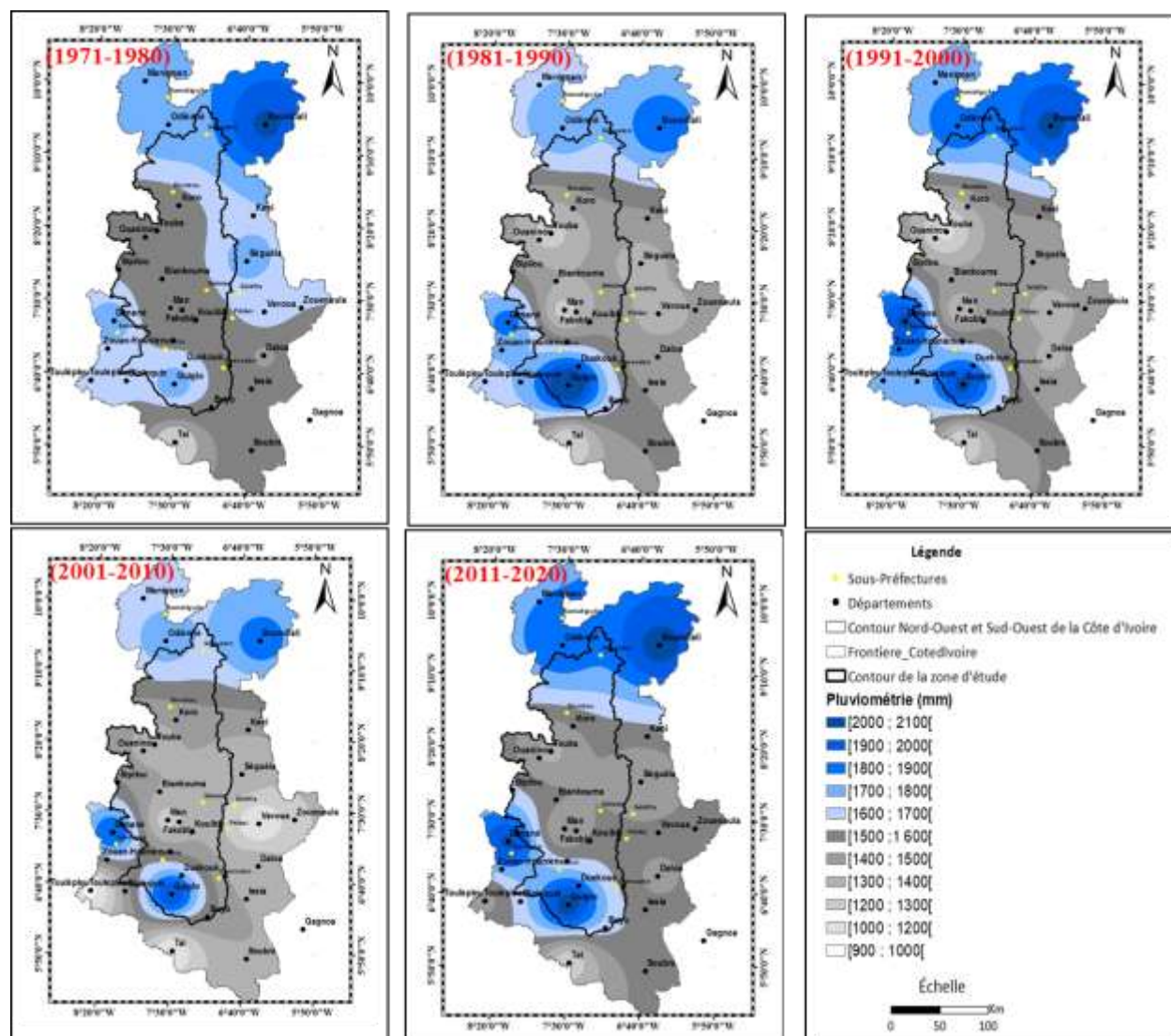


Figure 17 : Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des décennies

- **Analyse des variations des décennales pluviométriques par rapport à la normale 1981-2010**

La figure 18 présente respectivement les écarts des moyennes décennales 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 et 2011-2020 par rapport à la normale 1981-2010.

L'analyse des figures 18 montre une décroissance des écarts de la décennie 1971-1980 à la décennie 2011-2020. Les écarts les plus significatifs sont enregistrés dans la zone centrale du bassin, à la décennie 1991-2010 et atteignent -30%. L'observation de la figure 18 présente des écarts -30% à +30% dans certaines zones, toutefois, l'écart moyen sur l'ensemble du bassin à la décennie 1971-1980 vaut 6,8%. A la décennie 1981-1990, cet écart baisse à 3,7%. A la décennie 1991-2000, l'écart par rapport à la normale 1981-2010 augmente avant de chuter jusqu'à atteindre -5,8% à la décennie

2001-2010 et augmente à nouveau pour atteindre 5,9% à la décennie 2011-2020. L'analyse révèle que la décennie 2001-2010 reste la plus déficitaire.

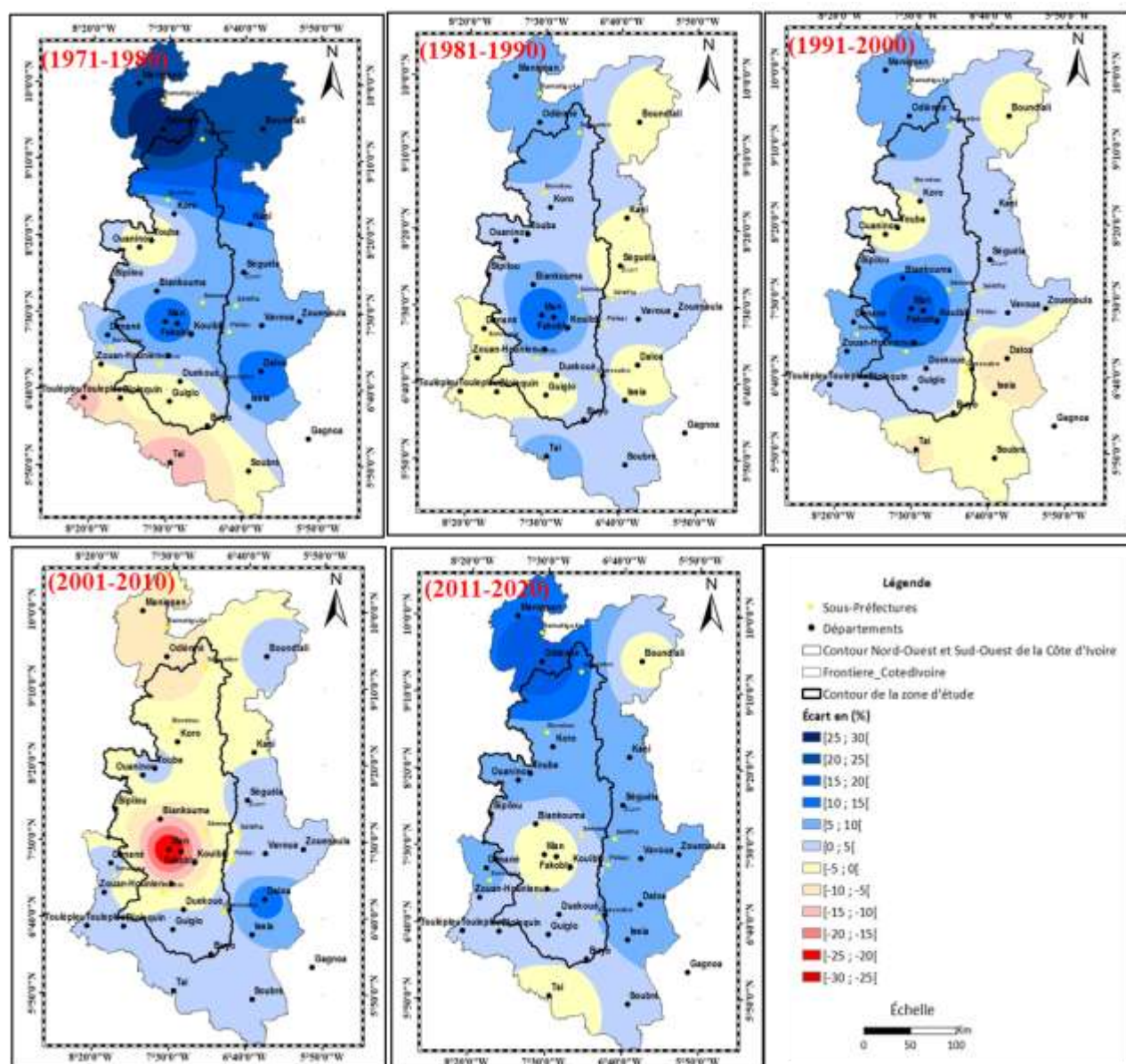


Figure 18 : Écart des moyennes décennales par rapport à la normale 1981-2010

5.1.4. Indices climatiques

Les résultats des indices climatiques présentés se déclinent en deux parties, une partie sur les indices de sécheresse pluviométrique et de la deuxième partie porte sur les indices des extrêmes climatiques.

5.1.4.1. Indices de sécheresse pluviométrique ou indices standardisés des précipitations

L'analyse s'est faite à deux échelles, une échelle temporelle et une échelle spatiale. Les résultats sont présentés par les figures 19, 20, 21, 22, 23 et 24.

- **Évolution spatiale des indice ISP**

Les figures 19, 20, 21, 22 et 23 présentent l'évolution spatiale des indices de sécheresse pluviométrique ISP. Elle présente respectivement l'évolution des indices ISP des décennies 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 et 2011-2020. L'analyse de la figure 23 montre une situation plus ou moins stable sur le bassin. En effet, les intensités des indices ISP sont compris entre -1 et +1,5. Ces intensités décrivent des situations traduites par une sécheresse qualifiée de « Légèrement sèche » et « Légèrement humide ».

Durant la période 1971-1980, le déficit pluviométrique est associé à des conditions légèrement sèches observées dans le bassin versant, plus particulièrement au Sud (Buyo, Guiglo et Duekoué) et certaines zones du Centre (Fakobly et Man) et du Centre-Ouest du bassin (Touba et Ouaninou). Cette période a également été marquée par un excès de précipitations associé à des conditions légèrement humides persistantes dans la zone du Nord (Odiénné et Koro), du Nord-Ouest (Danané et Sipilou) et Sud-Est (Guéssabo et Daloa). De toute la série, la période 1981-1990 reste la plus déficitaire (aucun excédent n'y est noté). Durant la décennie 1991-2000, le constat reste le même que celui fait à la période 1971-1980. Une sécheresse légère sur toute la partie nord du bassin et une petite partie du Sud et une humidité légère au Centre. Durant la décennie 2001-2010, la sécheresse envahit de nouveau l'ensemble du bassin et un retour à la normale est observable au cours de la décennie 2011-2020. Les zones importantes du bassin qui donnent naissance aux écoulements (la zone nord et ouest) sont touchées par la sécheresse. La zone nord est touchée par la sécheresse aux décennies 1981-1990, 1991-2000 et 2001-2010. La zone ouest quant à elle est touchée par la sécheresse à toutes les décennies. La remarque faite est qu'à la décennie 2001-2010, la zone Ouest a été marquée par une sécheresse de type forte.

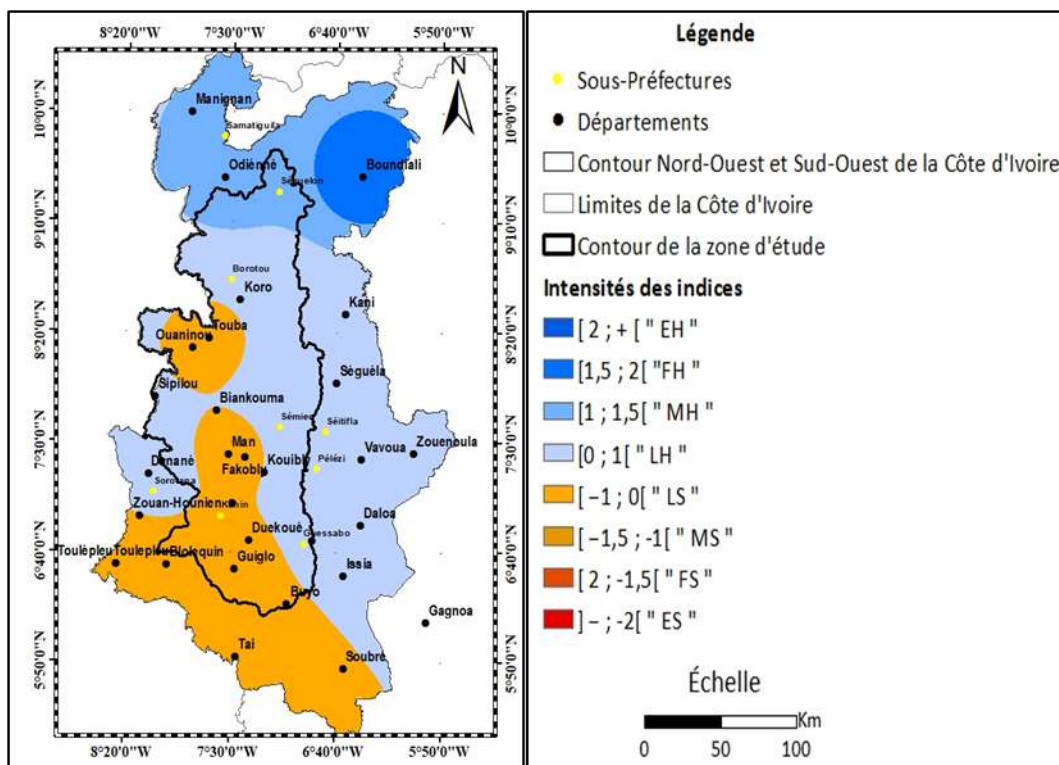


Figure 19 : Évolution des indices ISP de la décennie 1971-1980 par rapport à la normale 1981-2010

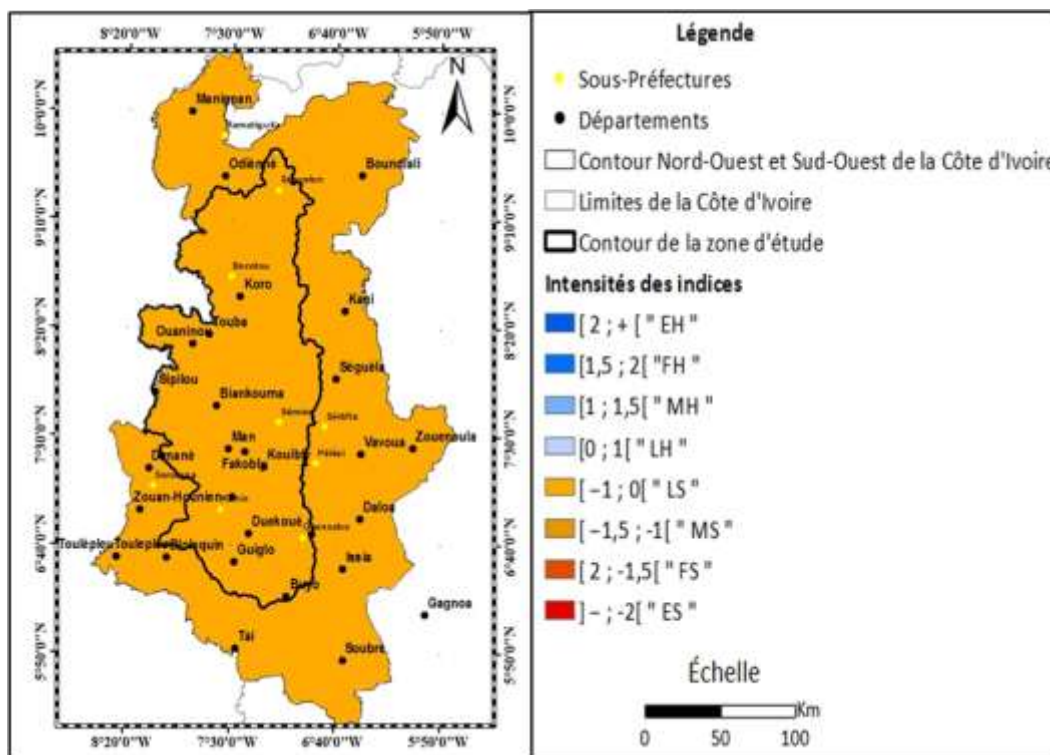


Figure 20 : Évolution des indices ISP de la décennie 1981-1990 par rapport à la normale 1981-2010

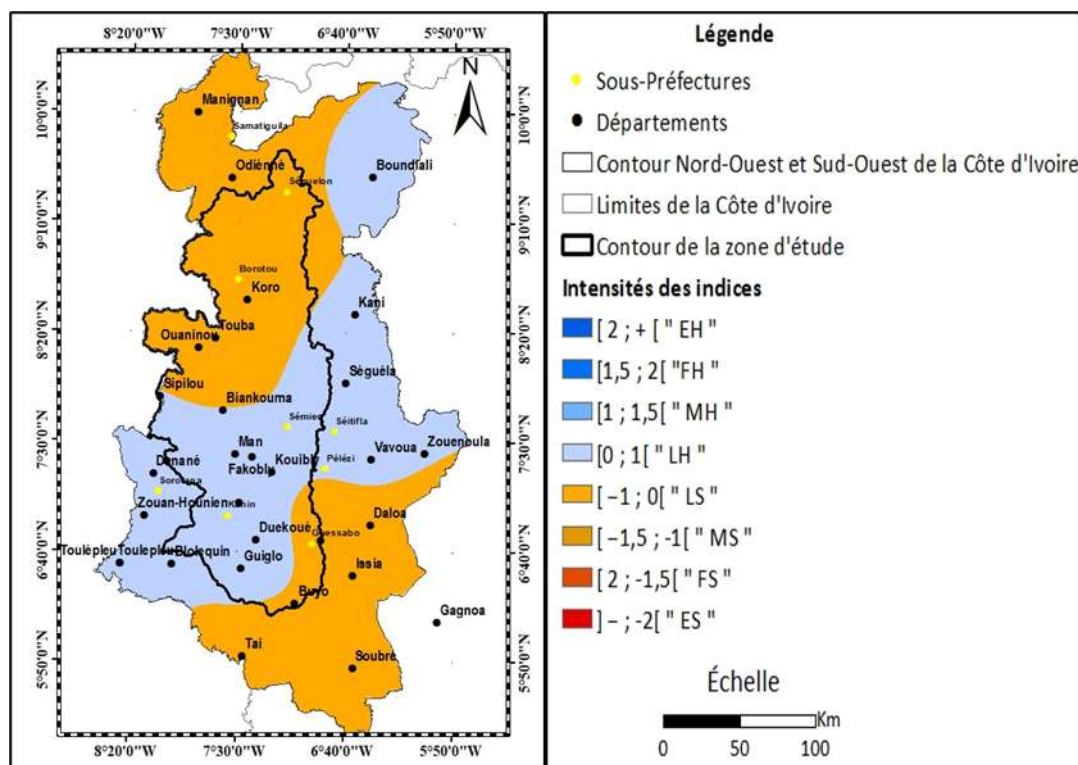


Figure 21 : Évolution des indices ISP de la décennie 1991-2000 par rapport à la normale 1981-2010

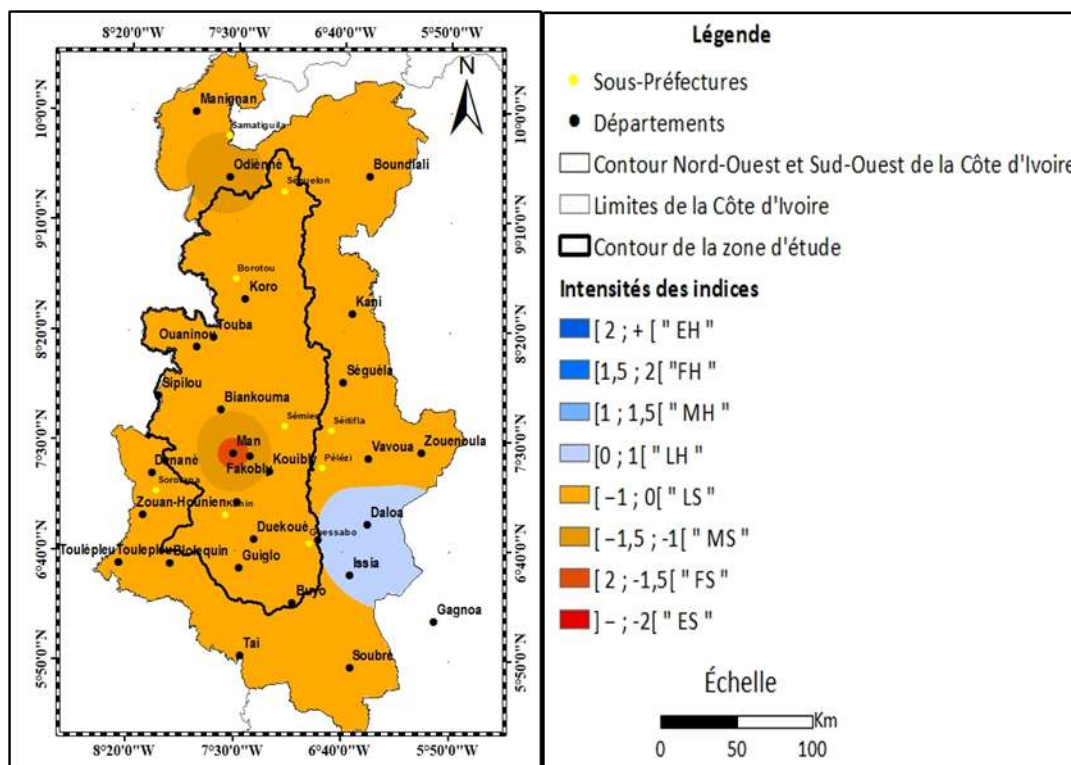


Figure 22 : Évolution des indices ISP de la décennie 2001-2010 par rapport à la normale 1981-2010

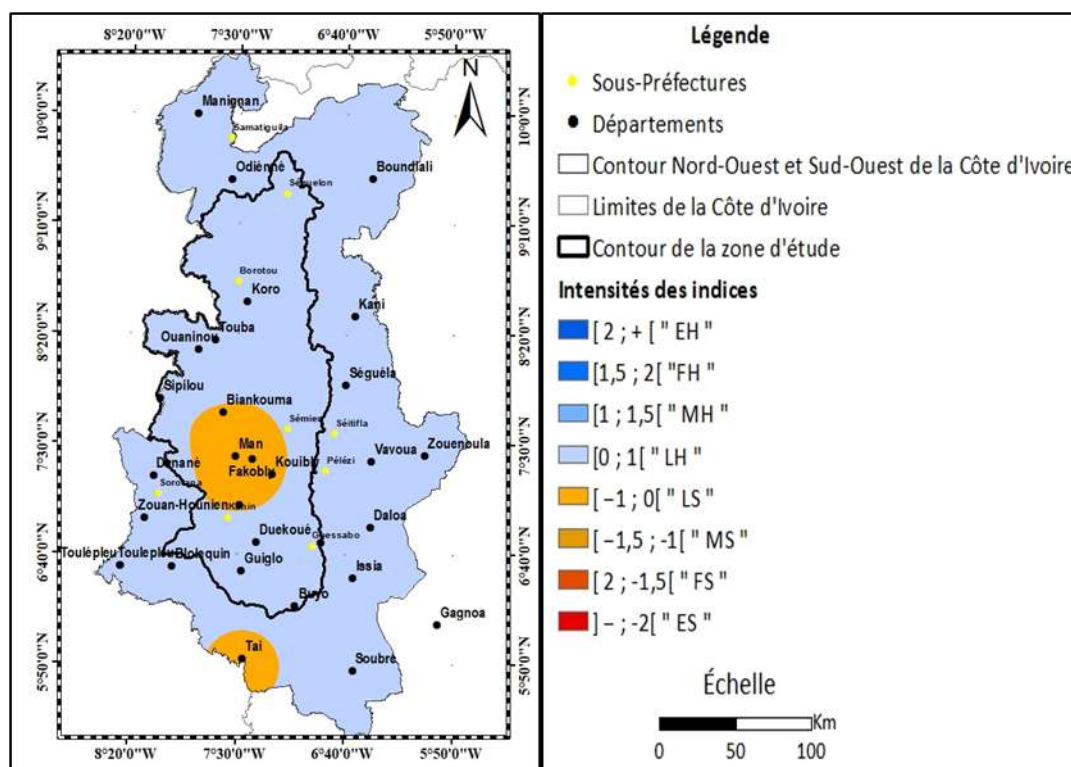


Figure 23 : Évolution des indices ISP de la décennie 2010-2020 par rapport à la normale 1981-2010

• Évolution temporelle des indices ISP

Les résultats de la figure 24 révèlent que la zone d'étude a fortement été impactée par de longues séquences sèches au cours de la période 1971-2020.

À Odiénné et à Daloa, trois périodes se dégagent, une période humide, une période sèche et une reprise de la pluviométrie. La première part depuis 1971 et s'arrête en 1980, la deuxième part de 1981 et s'arrête en 1995 à Daloa et en 2015 à Odiénné. Et la troisième part de 1996 à 2020 à Daloa et de 2016 à 2020 à Odiénné.

Aux stations de Man et de Tai, c'est l'événement contraire observé aux stations de Daloa et Odiénné. Trois périodes se dégagent, une période sèche de 1971 à 1992 à Man et de 1971 à 1994 à Tai, une période humide de 1993 à 2000 à Man et de 1983 à 1991 et une période sèche.

Aux stations de Guiglo, de Toulépleu, Danané, Vavoua et Séguéla, une période sèche et une période humide se dégagent. La période sèche est aperçue de 1971 à 2001, à Guiglo, de 1971 à 1995 à Toulépleu, de 1971 à 2008 à Danané, de 1971 à 2003 à Vavoua et de 1971 à 2001 à Séguéla. La

période humide est aperçue de 2002 à 2020, à Guiglo, de 1996 à 2020 à Toulépleu, de 2009 à 2020 à Danané, de 2004 à 2020 à Vavoua et de 2002 à 2020 à Séguéla.

À la station de Boundiali, deux périodes sont observables, une période humide de 1971 à 1980 et une longue période sèche de 1981 à 2020. À Touba, de 1971 à 2020, les ISP négatifs sont en majorités dominants, ce qui traduit une très longue période sèche. Le constat le plus marquant, est la domination de la sécheresse d'un point de vue général.

Le tableau XII présente les intensités, les fréquences et la durée de la sécheresse pluviométrique. De longues séquences sèches sont observables dans la majorité des stations de la zone d'étude. Toutes les stations ont enregistré des périodes sèches dites « Fortement sèches » ou qualifiées de sécheresse sévère ($ISP < -2$). À la lumière de la figure 24, la sécheresse la plus sévère a été observée en 1982 à Danané, 1973 à Touba, 1983 à Toulépleu, 2009 à Tai, 1979 Séguéla, 1983 à Guiglo, 2015 à Boundiali, 2003 à Vavoua, 1997 à Daloa, 2004 à Man et 2006 à Odiénné. La période la plus pluvieuse a été observée en 2014 à Danané, 2014 à Touba, 1996 à Toulépleu, 1991 à Tai, 1978 Séguéla, 1985 à Guiglo, 1974 à Boundiali, 1995 à Vavoua, 2002 à Daloa, 1999 à Man et 1976 à Odiénné. Tous ces résultats traduisent la forte variabilité de la pluviométrie dans la zone d'étude. Le tableau XII donne une synthèse des années des intensités de sécheresse et les pourcentages des indices de sécheresses pluviométriques. La ville de Man enregistre 35 années sèches soit 70% et Daloa enregistre plus d'années humides avec 33 soit un pourcentage de 66% de ISP.

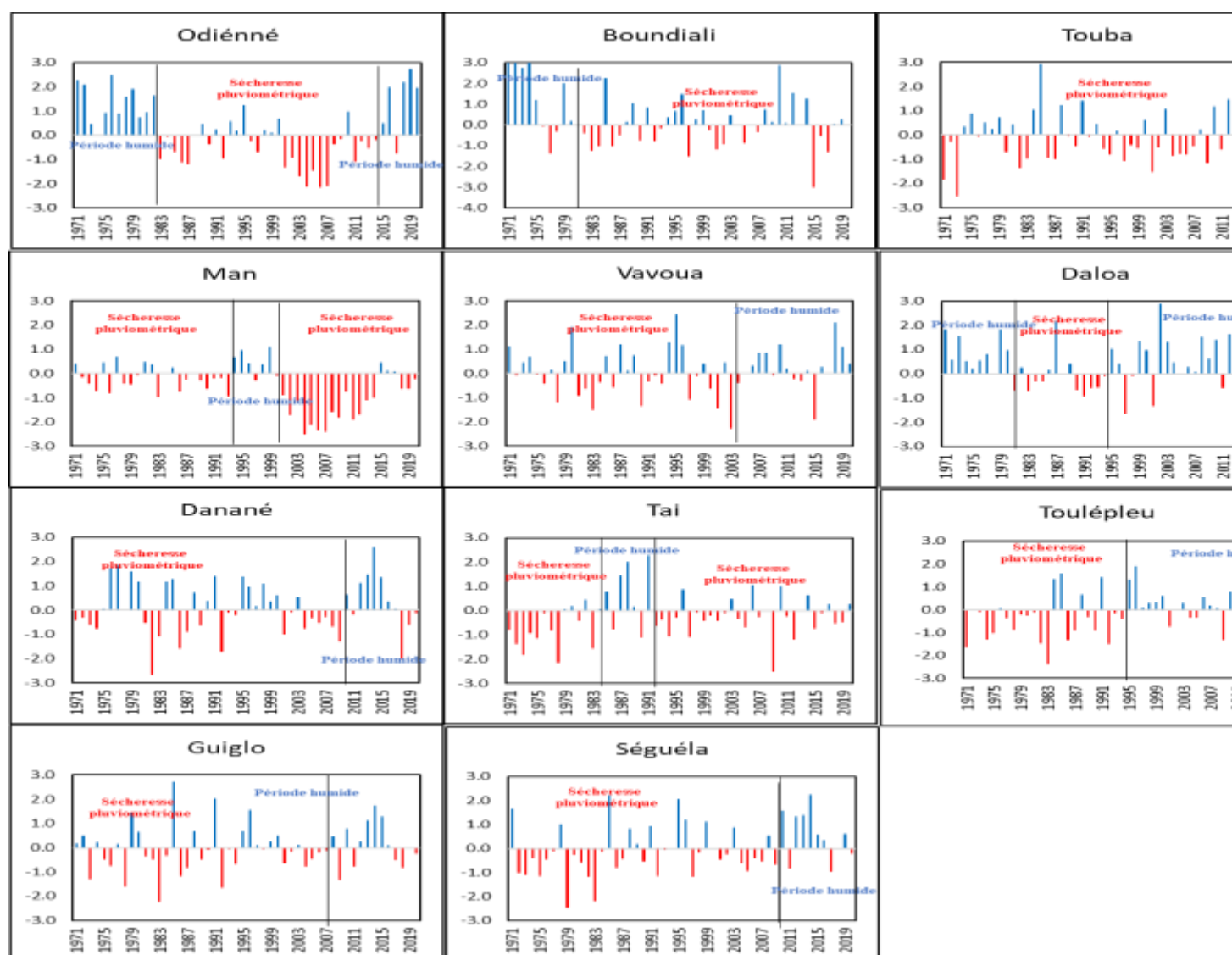


Figure 24 : Indices de sécheresse pluviométrique dans le bassin versant du fleuve Sassandra

Tableau XII : Intensité et pourcentage des indices ISP des stations de la zone d'étude

	Danané	Touba	Toulépleu	Tai	Séguéla	Guiglo	Boundiali	Vavoua	Daloa	Man	Odiénné
Années sèches	26	28	26	33	30	28	22	24	17	35	23
Années humide	24	22	24	17	20	22	28	26	33	15	27
Années sèches	52%	56%	52%	66%	60%	56%	44%	48%	34%	70%	46%
Années humide	48%	44%	48%	34%	40%	44%	56%	52%	66%	30%	54%
Min	-2,7	-2,5	-2,4	-2,5	-2,5	-2,2	-3,0	-2,3	-1,7	-2,5	-2,2
Max	2,6	2,9	1,9	2,3	2,8	2,7	2,4	2,4	2,9	1,1	2,7
Moy	0,1	-0,1	-0,1	-0,3	0,2	0,0	0,3	0,1	0,5	-0,5	0,2

5.1.4.2. Indices des extrêmes climatiques

L'analyse des tendances du climat basée sur les précipitations et les températures extrêmes met en évidence les tendances climatiques. Les résultats sont repartis par station afin de faire ressortir les spécificités de chaque zone d'étude.

- **Station de Daloa**

Les valeurs de cumuls des indices des extrêmes climatiques sont présentées sur la figure 25. Ces résultats mettent en évidence les tendances des indices de précipitations (Rx1day, Rx5day, Prcptot, Cdd et R95p) et de températures (TXx, TN90p et TX90p) à la station de Daloa par la droite de tendance linéaire. Au niveau des indices de précipitations, les indices Rx1day, Rx5day, Prcptot et R95p présentent tous une tendance à la hausse respectivement de 0,33 mm/an, 0,55 mm/an, 4,9 mm/an et de 4,2 mm/an. La tendance de ces indices n'est statistiquement pas significative avec des p-value > 0,05. L'indice Cdd présente une tendance à la baisse de 0,0081 mm/an. Statistiquement, cette tendance n'est pas significative. Concernant les indices de températures, une tendance à la hausse est observée au niveau des trois indices (TXx, TN90p et TX90p). Ces tendances sont statistiquement significatives avec des p-value < 0,05. Ces indices ont des tendances à la hausse respectivement de 0,42°C, 0,4189°C et de 0,915°C.

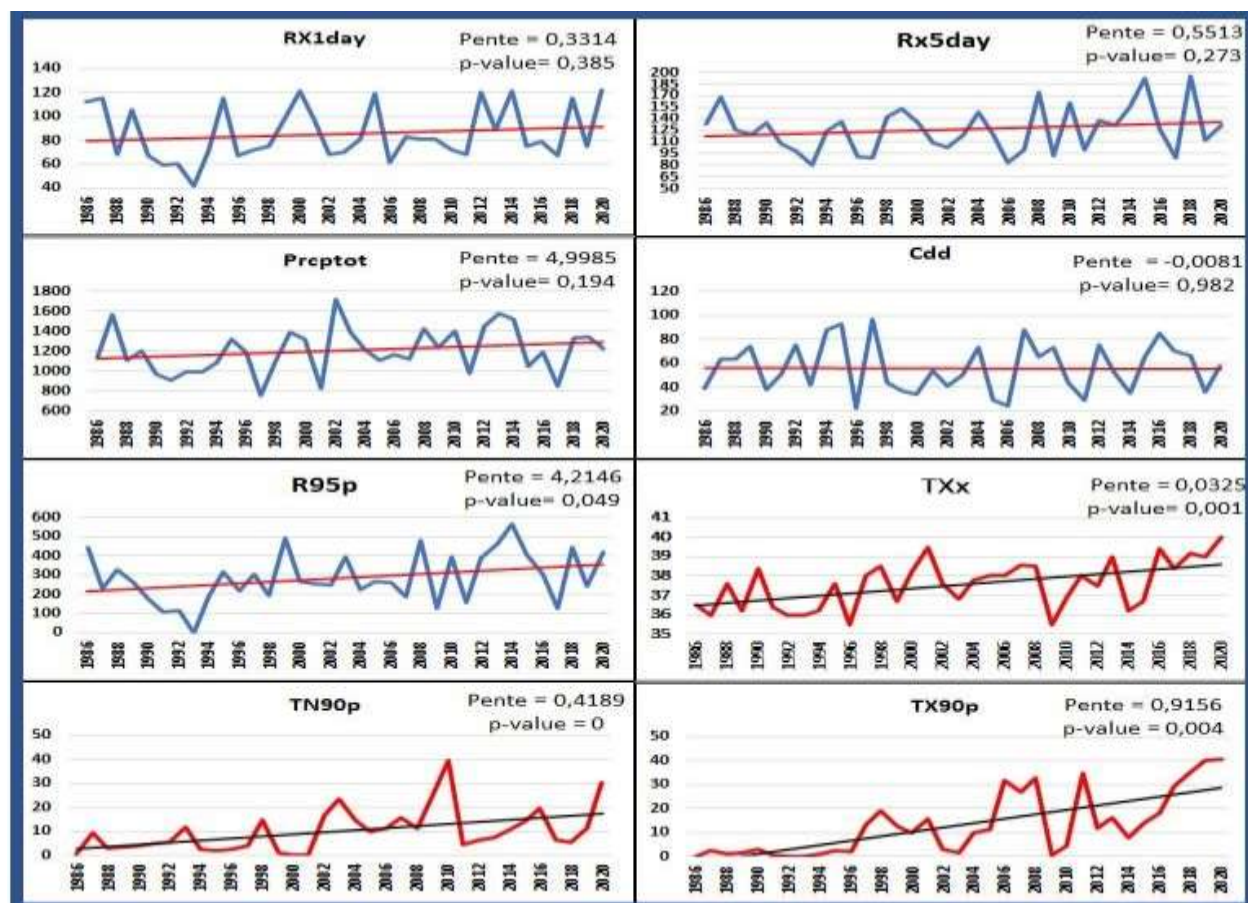


Figure 25 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station de Daloa

■ Station de Man

La figure 26 montre qu'au niveau des indices de précipitations, les indices Rx1day Rx5day, Prcptot, Cdd et R95p présentent tous une tendance à la baisse respectivement de 0,62 mm/an, 1,27 mm/an, 9,1 mm/an, 0,43 mm/an et 6,14 mm/an. La tendance de ces indices est statistiquement significative avec des $p\text{-value} < 0,05$. L'analyse des indices de température, montre une tendance à la hausse au niveau des indices TN90p et TX90p. Ces tendances sont statistiquement significatives avec des $p\text{-value} < 0,05$. Ces tendances sont respectivement de 0,64°C et de 0,48°C. L'indice TXx quant à lui a une tendance à la baisse de 0,16°C qui n'est statistiquement pas significative.

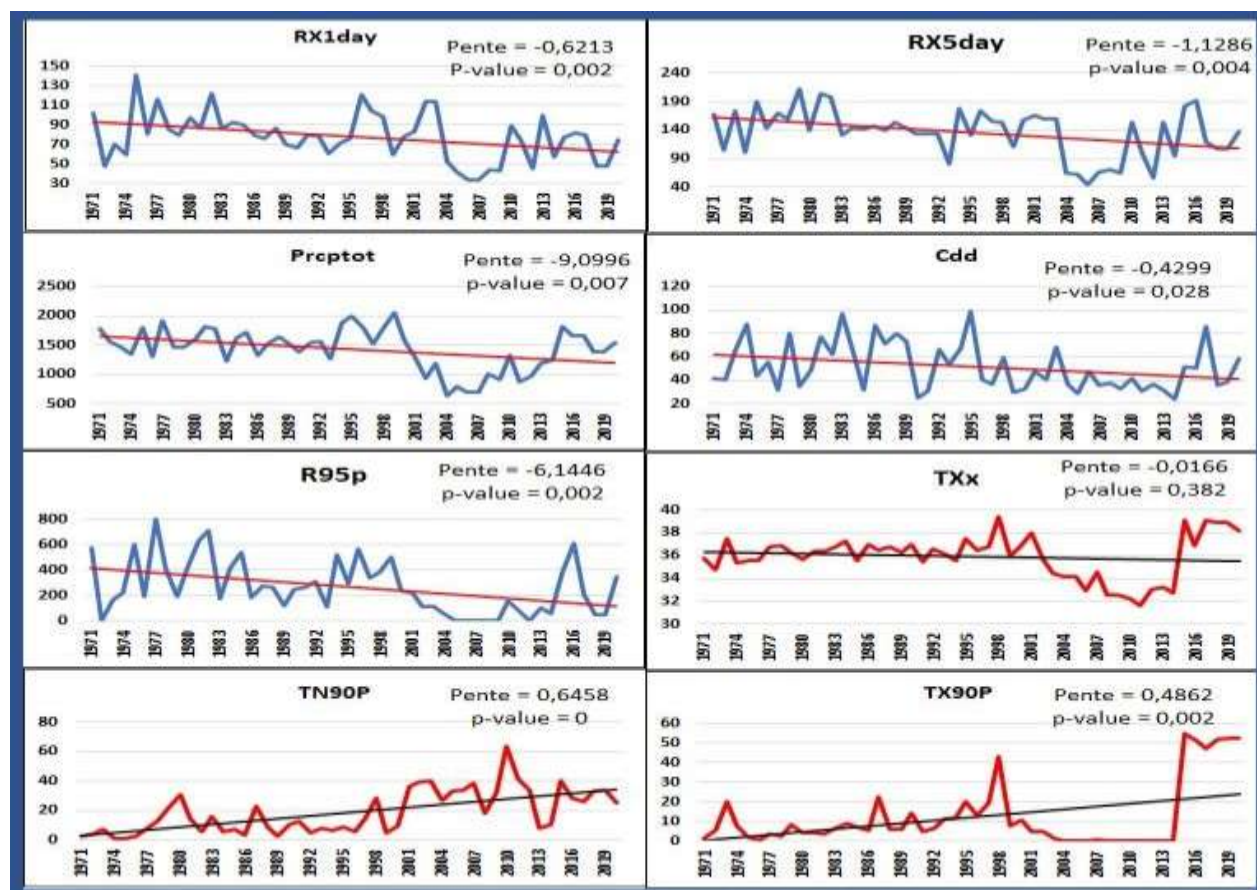


Figure 26 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station de Man

■ Station d'Odienné

L'analyse de la figure 27 montre qu'au niveau des indices de précipitation, les indices Rx1day, Rx5day, Prcptot, Cdd et R95p présentent tous une tendance à la baisse respectivement de 0,72 mm/an, 0,94 mm/an, 4,2 mm/an, 0,17 mm/an et 1,96 mm/an. La tendance de ces indices est statistiquement significative avec des p-value < 0,05. En moyenne, la tendance des précipitations dans la zone d'étude est à la baisse. L'analyse des indices de température, montre une tendance à la hausse au niveau des indices TXx, TN90p et TX90p. Ces tendances sont statistiquement significatives avec des p-value < 0,05. Ces tendances sont respectivement de 0,04°C, 0,6°C et de 0,49°C. L'indice TXx quant à lui a une tendance à la baisse de 0,16°C qui n'est statistiquement pas significative.

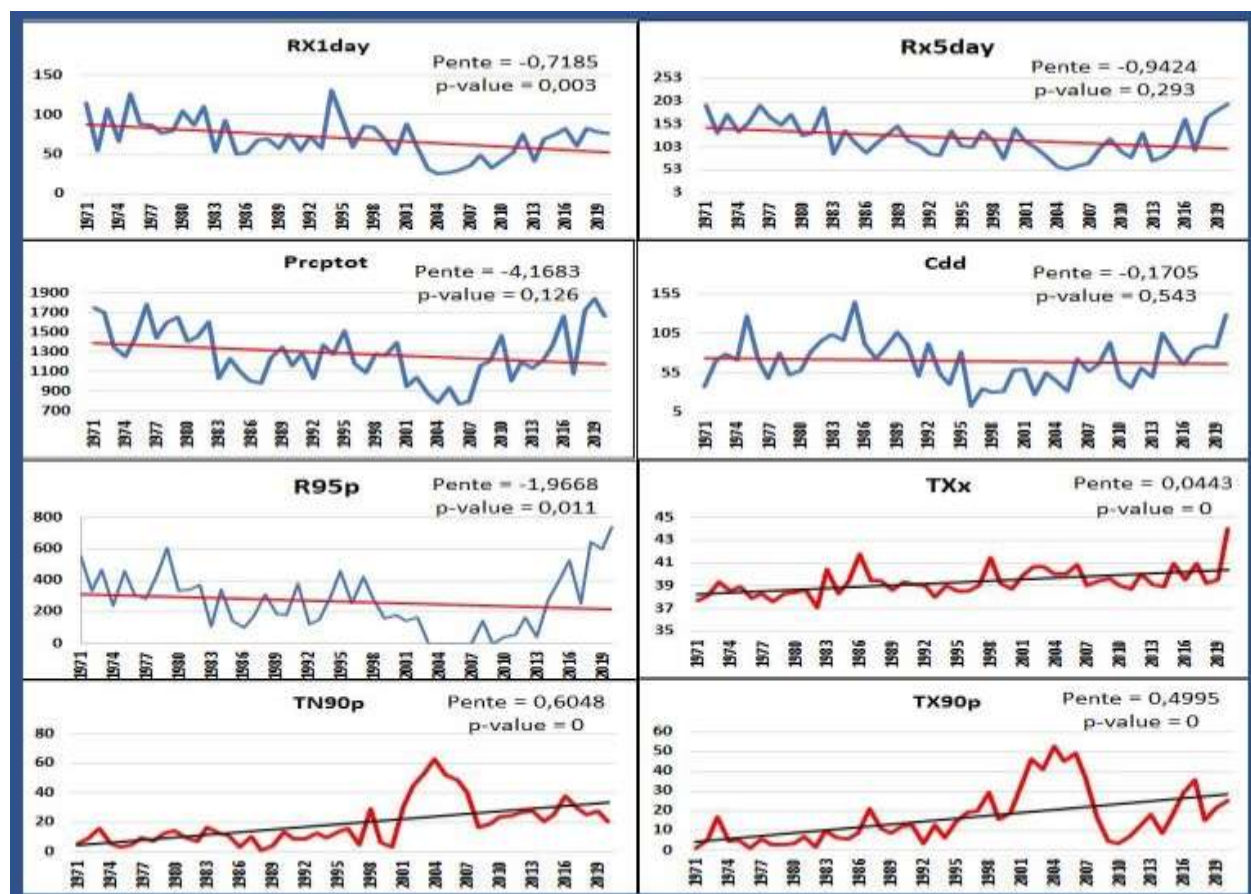


Figure 27 : Evolution interannuelle des indices des extrêmes climatiques à la station d'Odienné

L'analyse des indices (Tableau XIII) montre que les indices de pluies sont en hausse à Daloa et en baisse à Man et Odienné. Mais statistiquement, ces tendances ne sont significatives qu'à la station de Man. Néanmoins, les indices R95p (Daloa) et les indices Rx1day (Odienné) présentent des tendances statistiquement significatives. Quant aux indices de température, l'analyse du tableau XIII montre une tendance statistiquement significative à la hausse à toutes les stations à l'exception de la station de Man où l'indice TXx présente une tendance à la baisse qui statistiquement n'est pas significative.

Tableau XIII : Caractéristiques des indices des extrêmes climatiques

Station	Daloa		Man		Odiénné	
Indices	p-value	Pente	p-value	Pente	p-value	Pente
Rx1day	0,3314	+0,385	0,002	-0,62	0,003	-0,72
Rx5day	0,273	+0,5513	0,004	-1,27	0,293	-0,94
Preptot	0,195	+4,9985	0,007	-9,1	0,126	-4,2
Cdd	0,982	-0,0081	0,028	-0,43	0,543	-0,17
R95p	0,0049	+4,2146	0,002	-6,14	0,011	-1,96
TXx	0,001	+0,42	0,382	-0,16	0,001	+0,44
TN90p	0,001	+0,4189	0,001	+0,64	0,001	+0,60
TX90p	0,004	+0,915	0,002	+0,48	0,001	+0,49

5.2. Variabilité hydrologique

Les résultats présentés permettent de comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de 1971 à 2020. Il s'est agi de combler les débits manquants aux stations de Piébli et Kahin, ensuite d'analyser les normales et décennales hydrologiques puis les sécheresses hydrologiques à travers les indices IHN, ISD et ILDH.

5.2.1. Comblement des débits manquants

L'utilisation du modèle GR4J pour le comblement des débits, a donné les résultats ci-dessous (Tableau XIV). D'après les valeurs du critère de Nash obtenues, le calage et la validation sont corrects (satisfaisants) pour les deux sous-bassins. Dans l'ensemble, ces résultats sont jugés satisfaisants pour une simulation des lames d'eau écoulées sur les sous-bassins.

Tableau XIV : Caractéristiques des sous-bassins et des calages-validations du modèle GR4J

Bassin	Paramètres				Calage		Validation	
	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	X ₄ (mm)	Périodes	Nash (%)	Périodes	Nash (%)
Kahin (14056 Km ²)	2,44	-6.12	6,74	2.25	1985-1989	79,1	1976-1982	73,1
Piébli (25330 Km ²)	2,69	-4.23	6,30	1,92	1985-1989	83,4	1976-1982	71,1

5.2.2. Normales et décennales hydrologiques

Les résultats de l'analyse des normales et des décennales hydrologiques permettent d'avoir un aperçu sur l'évolution des débits dans le temps.

5.2.2.1. Normales hydrologiques

La figure 28 présente les normales hydrométriques 1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020. La figure 28a présente l'évolution des écoulements de la station hydrométrique de Piébli et la figure 28b, présente l'évolution des écoulements de la station hydrométrique de Kahin.

L'analyse de la figure 28 montre que les normales 1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020 évoluent simultanément. Elles atteignent leur maximum en septembre. Les écoulements baissent de la normale 1971-2000 à la normale 1981-2010 puis augmentent à la normale 1991-2020. Les écoulements enregistrés à la normale 1991-2020 sont plus importants que ceux de la normale 1971-2000 et 1981-2010.

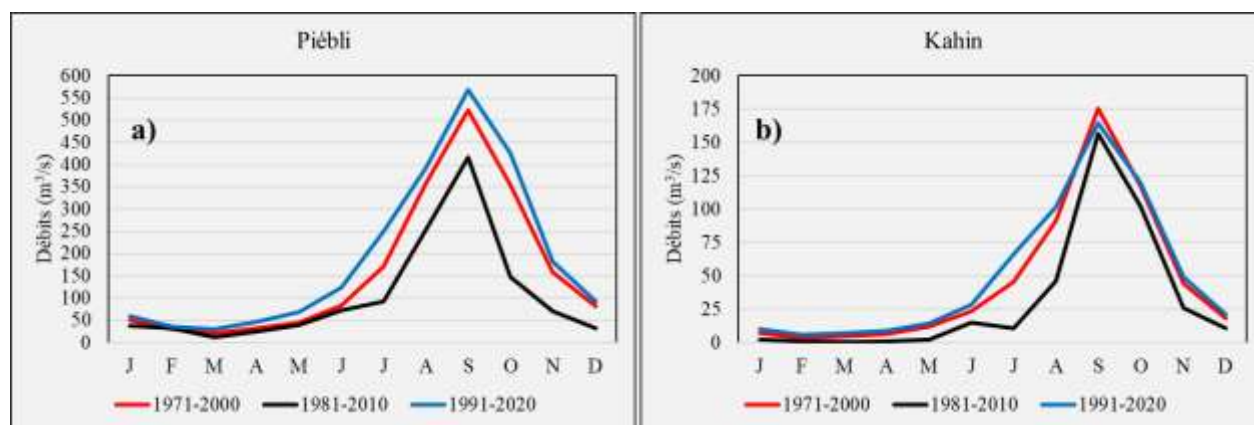


Figure 28 : Normales hydrologiques aux stations de Kahin et Piébli

5.2.2.2. Décennales hydrologiques

La figure 29 présente les débits décennaux des stations hydrométriques de Piébli (Figure 29a) et de Kahin (Figure 29b).

L'analyse des débits décennaux montre une hausse générale de l'écoulement depuis la première décennie au niveau des deux stations hydrométriques. Néanmoins, des spécificités restent à relever. En effet, de la décennie 1971-1980 à la décennie 1981-1990 et 1991-2000, une évolution de l'écoulement à la hausse aux deux stations hydrométriques est observable traduisant l'augmentation des débits. Par contre, au cours de la décennie 2001-2010, une baisse significative

de l'écoulement suivie d'une hausse peu significative au cours de la décennie 2011-2020 est également observable.

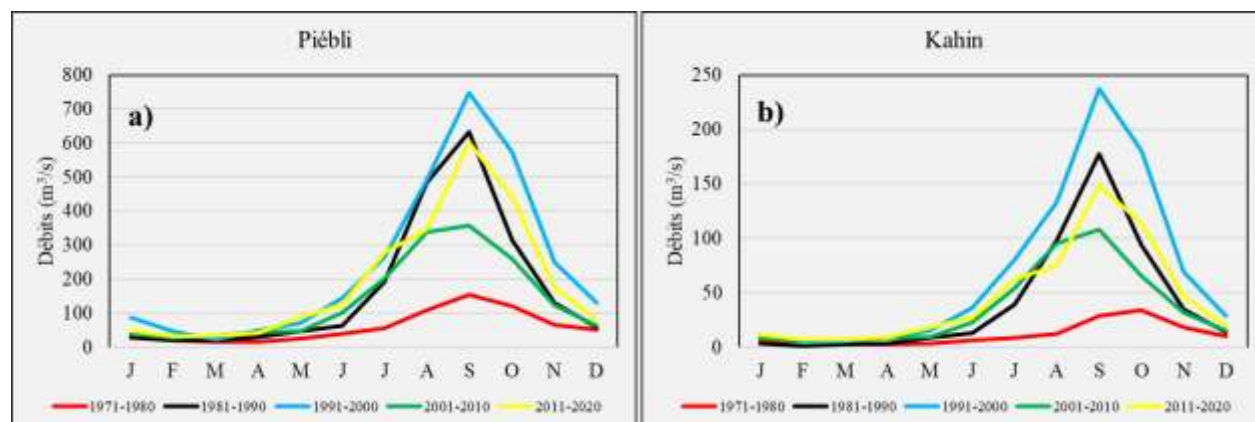


Figure 29 : Décennales hydrologiques aux stations de Kahin et Piébli

5.2.3. Indices hydrologiques

- **Analyse de la durée et de la fréquence de la sécheresse**

L'analyse de la durée et de la fréquence des séquences sèches est basée sur le résultat du Tableau XV. À Piébli et à Kahin, les trois indices calculés indiquent à l'unanimité la plus longue sécheresse hydrologique de 1971 à 1980 (10 années). Les fréquences des épisodes de sécheresse observées dans le bassin versant sont de 49 % et 53% pour l'indice IHN, 53 % et 49 % pour l'indice ISD et 53 % et 52 %, pour l'indice ILDH respectivement à Piébli et Kahin.

Tableau XV : Durée et fréquence des séquences de sécheresses à l'échelle mensuelle de 1971-2020

Paramètres	IHN		ISD		ILDH	
	Piébli	Kahin	Piébli	Kahin	Piébli	Kahin
Durée maximale	1971-1980	1971-1980	1971-1980	1971-1980	1971-1980	1971-1980
Fréquence cumulée (%)	49%	53%	53%	49%	53%	52%

La figure 30 et le tableau XV présentent respectivement l'évolution temporelle des indices IHN, ISD et ILDH, leurs séquences et leurs intensités.

L'analyse des résultats (Figure 30) met en évidence les intensités des séquences sèches sur les deux sous bassins. À la station de Piébli et de Kahin (Figure 30), deux grandes périodes peuvent être

dégagées, il s'agit de la période sèche et humide. Les séquences sèches apparaissent deux fois aux cours de la période 1971-2020.

Les séquences sèches les plus remarquables ont été enregistrées entre 1971 et 1980 aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin. Dans l'ensemble, sur la période 1971 et 1980, les trois indices (IHN, ISD et ILDH) indiquent une longue séquence sèche et sur la période 1992 à 2002, une longue période humide. L'analyse du tableau XVI montre que les intensités de la sécheresse les plus extrêmes sont de type « modéré » à Piébli (-1,5) en 1973 et 1976, et à Kahin (-1,3) de 1973 à 1976 et en 1978.

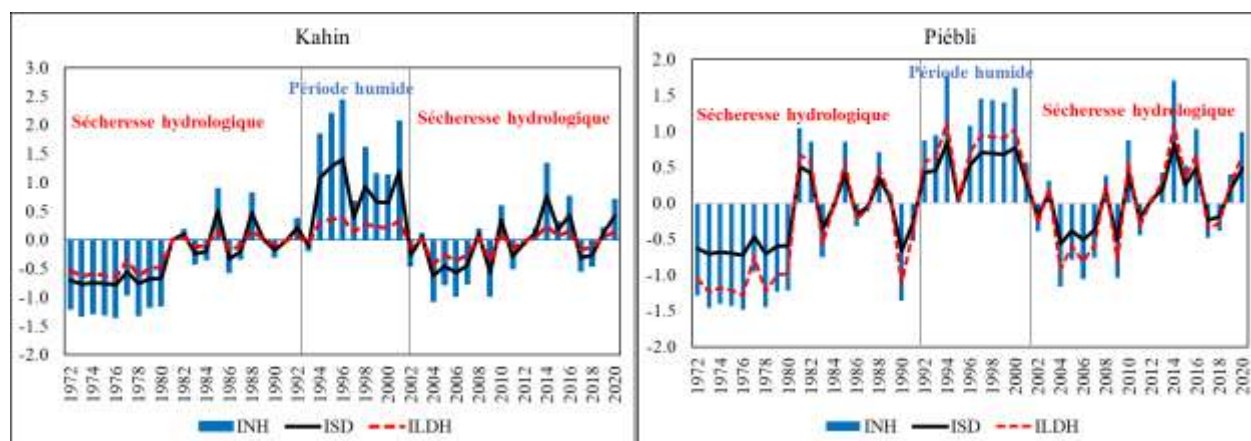


Figure 30 : Indices IHN, ISD et ILD aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin

Tableau XVI : Séquences et intensités de la sécheresse hydrologique aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin

Années	Piébli		Kahin		Piébli		Kahin		Piébli		Kahin	
	INH		INH		ISD		ISD		ILDH		ILDH	
	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence
1972	-1.3	MS	-1.2	MS	-0.7	S	-0.6	S	-0.5	MS	-0.4	MS
1973	-1.5	MS	-1.3	MS	-0.8	S	-0.7	S	-0.6	MS	-0.5	MS
1974	-1.4	MS	-1.3	MS	-0.7	S	-0.7	S	-0.6	MS	-0.5	MS
1975	-1.4	MS	-1.3	MS	-0.8	S	-0.7	S	-0.6	MS	-0.5	MS
1976	-1.5	MS	-1.3	MS	-0.8	S	-0.7	S	-0.7	MS	-0.6	MS
1977	-1.0	LS	-1.0	LS	-0.6	S	-0.5	S	-0.3	MS	-0.3	MS
1978	-1.4	MS	-1.3	MS	-0.8	S	-0.7	S	-0.6	MS	-0.5	MS
1979	-1.2	MS	-1.2	MS	-0.7	S	-0.6	S	-0.5	MS	-0.4	MS
1980	-1.2	MS	-1.2	MS	-0.7	S	-0.6	S	-0.5	MS	-0.4	MS
1981	1.0	MH	0.0	LH	0.0	N	0.5	N	0.0	LH	0.2	LH
1982	0.9	LH	0.2	LH	0.1	N	0.4	N	0.0	LH	0.2	LH
1983	-0.8	LS	-0.4	LS	-0.2	S	-0.4	S	-0.1	MS	-0.2	MS
1984	-0.1	LS	-0.3	LS	-0.2	S	0.0	S	-0.1	MS	0.0	MS
1985	0.9	LH	0.9	LH	0.5	N	0.4	N	0.2	LH	0.2	LH
1986	-0.3	LS	-0.6	LS	-0.3	S	-0.2	S	-0.2	MS	-0.1	MS
1987	-0.1	LS	-0.3	LS	-0.2	S	-0.1	S	-0.1	MS	0.0	MS
1988	0.7	LH	0.8	LH	0.5	N	0.3	N	0.2	LH	0.1	LH
1989	0.1	LH	0.0	LH	0.0	N	0.1	N	0.0	LH	0.0	LH
1990	-1.4	MS	-0.3	LS	-0.2	S	-0.7	S	-0.1	MS	-0.5	MS
1991	-0.5	LS	0.0	LS	0.0	S	-0.3	S	0.0	MS	-0.1	MS
1992	0.9	LH	0.4	LH	0.2	N	0.4	N	0.1	LH	0.2	LH
1993	0.9	LH	-0.2	LS	-0.1	S	0.5	N	0.0	MS	0.2	LH
1994	1.8	FH	1.8	FH	1.1	H	0.9	N	0.3	LH	0.3	LH
1995	0.1	LH	2.2	EH	1.3	H	0.0	N	0.4	LH	0.0	LH

ES : Extrêmement sèche
 FS : Fortement sèche
 MS : Modérément sèche
 LS : Légèrement sèche
 S : Sèche

N : Normale
 LH : Légèrement humide
 MH : Modérément humide
 FH : Fortement humide
 EH : Extrêmement humide

	Piébli		Kahin		Piébli		Piébli		Kahin		Piébli	
	INH		INH		ISD		ISD		ILDH		ILDH	
Années	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence	Intensité	Séquence
1996	1.1	MH	2.4	EH	1.4	H	0.5	N	0.4	LH	0.2	LH
1997	1.5	MH	0.7	LH	0.4	N	0.7	N	0.1	LH	0.2	LH
1998	1.4	MH	1.6	FH	0.9	N	0.7	N	0.3	LH	0.2	LH
1999	1.4	MH	1.1	MH	0.7	N	0.7	N	0.2	LH	0.2	LH
2000	1.6	FH	1.1	MH	0.7	N	0.8	N	0.2	LH	0.3	LH
2001	0.6	LH	2.1	EH	1.2	H	0.3	N	0.3	LH	0.1	LH
2002	-0.4	LS	-0.5	LS	-0.3	S	-0.2	S	-0.1	MS	-0.1	MS
2003	0.3	LH	0.1	LH	0.1	N	0.2	N	0.0	LH	0.1	LH
2004	-1.2	MS	-1.1	MS	-0.6	S	-0.6	S	-0.4	MS	-0.4	MS
2005	-0.8	LS	-0.8	LS	-0.5	S	-0.4	S	-0.3	MS	-0.2	MS
2006	-1.1	MS	-1.0	LS	-0.6	S	-0.5	S	-0.4	MS	-0.3	MS
2007	-0.8	LS	-0.8	LS	-0.4	S	-0.4	S	-0.3	MS	-0.2	MS
2008	0.4	LH	0.2	LH	0.1	N	0.2	N	0.0	LH	0.1	LH
2009	-1.0	MS	-1.0	LS	-0.6	S	-0.5	S	-0.4	MS	-0.3	MS
2010	0.9	LH	0.6	LH	0.3	N	0.4	N	0.1	LH	0.2	LH
2011	-0.4	LS	-0.5	LS	-0.3	S	-0.2	S	-0.1	MS	-0.1	MS
2012	0.1	LH	-0.1	LS	-0.1	S	0.0	N	0.0	MS	0.0	LH
2013	0.4	LH	0.2	LH	0.1	N	0.2	N	0.0	LH	0.1	LH
2014	1.7	FH	1.3	MH	0.8	N	0.8	N	0.2	LH	0.3	LH
2015	0.5	LH	0.3	LH	0.2	N	0.3	N	0.1	LH	0.1	LH
2016	1.0	MH	0.8	LH	0.4	N	0.5	N	0.2	LH	0.2	LH
2017	-0.5	LS	-0.5	LS	-0.3	S	-0.2	S	-0.2	MS	-0.1	MS
2018	-0.4	LS	-0.5	LS	-0.3	S	-0.2	S	-0.1	MS	-0.1	MS
2019	0.4	LH	0.2	LH	0.1	N	0.2	N	0.1	LH	0.1	LH
2020	1.0	LH	0.7	LH	0.4	N	0.5	N	0.1	LH	0.2	LH

ES : Extrêmement sèche
 FS : Fortement sèche
 MS : Modérément sèche
 LS : Légèrement sèche
 S : Sèche

N : Normale
 LH : Légèrement humide
 MH : Modérément humide
 FH : Fortement humide
 EH : Extrêmement humide

Discussion

L'analyse des normales pluviométriques (1971-2000, 1981-2010) et décennales (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) montre que la pluie a connu une régression au cours du temps. Les hauteurs de pluie baissent d'une normale à une autre et d'une décennie à l'autre. Néanmoins, les résultats montrent une faible reprise pluviométrique au cours de la décennie 2011-2020. Ces résultats s'accordent avec ceux des recherches effectuées en Afrique de l'Ouest (Goula *et al.*, (2006) ; Amani *et al.*, (2010) ; Soro *et al.*, (2014)). Ils sont aussi confirmés par les travaux menés sur le bassin versant de la Falémé au Sénégal (Faye, 2013) et celui du fleuve Sénégal (Dione, 1998 ; Sagna, 2005 ; Faye *et al.*, 2013 ; Faye *et al.*, 2015 ; Faye, 2017). Ces travaux ont montré que les décennies 1970, 1980 et 1990 ont été des périodes sèches marquées par un fort déficit pluviométrique. Dans le cas des études de Dione (1998), qui ont porté sur l'évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, Dione (1998) a montré que l'évolution des précipitations au cours de la période 1931-1993 suit une tendance à la normale des précipitations jusque dans les années 1960. Au-delà, se dégage une nette diminution des pluies dans toutes les stations. Faye *et al.* (2017) ont également montré que les déficits pluviométriques les plus remarquables ont été observés durant les décennies 1960 et 1970. Cependant, les résultats de cette étude ont montré que la décennie 1971-1981 est excédentaire comparée aux autres décennies de la série étudiée. Ces résultats ont également souligné que le nord du bassin est plus arrosé que les autres zones du bassin. Koua *et al.* (2019) ont obtenu dans leurs études sur le bassin versant du Sassandra, que les précipitations fortes sont localisées dans la partie nord-ouest et sud du bassin. Cette situation peut s'expliquer par le fait que la partie nord-ouest du bassin se trouve dans des zones montagneuses qui favorisent plus la formation de masse nuageuse. Concernant la partie sud-ouest, cela pourrait s'expliquer par la présence de forêt dans la zone qui favorise également la formation de masses nuageuses.

L'analyse de l'indice standardisé de précipitations (ISP) calculé sur une échelle spatiale et temporelle a permis de caractériser le type de sécheresse qui a sévit dans la zone d'étude. La sécheresse et l'humidité enregistrées dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo sont dites légères sur l'ensemble de la période étudiée même si certaines stations ont enregistré des sécheresses sévères. D'après les résultats, sur l'ensemble de la période 1971-2020, la sécheresse est plus dominante (53%). Ces résultats confirment bien que le bassin a connu un déficit

pluviométrique et concordent avec les résultats des recherches effectuées par Servat *et al.* (1999), Sighomnou (2004), Goula *et al.* (2006) et Soro *et al.* (2014).

Au regard de l'évolution des indices des extrêmes climatiques, la zone d'étude connaît des baisses de précipitations. En effet, tous les indices de pluie sont en baisse à Man et Odiénné et en hausse à Daloa à l'exception de l'indice Cdd qui présente une évolution à la baisse dans les trois régimes climatiques. Néanmoins, sur l'ensemble du bassin, ces indices sont en baisse. Ces différentes tendances indiquent que la zone d'étude est frappée par une récession pluviométrique. Ces résultats sont similaires à ceux de New *et al.* (2006), Aguilar *et al.* (2009), Muhindo *et al.*, (2012) et Donat *et al.*, (2013). En effet, dans leur étude sur l'évolution des conditions climatiques extrêmes quotidiennes couvrant le Sud et l'Ouest de l'Afrique, New *et al.*, (2006) ont montré que, globalement, les régions connaissent une baisse des précipitations totales annuelles (Prcptot) et du nombre de jours de pluie. Aguilar *et al.* (2009) dans leur analyse des précipitations de l'Afrique centrale entre 1955 et 2006 sont arrivés aux mêmes conclusions. Outre les cumuls des précipitations, Donat *et al.* (2013) dans leur étude pour la mise à jour des analyses des indices de température et de précipitation extrêmes depuis le début du XXe siècle ont montré des tendances de l'indice Cdd vers des conditions plus sèches en Asie de l'Est, en Australie, en Afrique du Sud, et dans des parties de l'Amérique du Sud. De même Muhindo *et al.* (2012) ont montré la baisse de la plupart des indices pluviométriques dans la ville de Butembo (Nord Kivu/RDC).

L'analyse des normales hydrologiques (1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020) montre que les normales 1971-2000, 1981-2010 et 1991-2020 évoluent de la même manière. Elles atteignent leur pic en septembre. Les écoulements baissent de la normale 1971-2000 à la normale 1981-2010 puis augmentent à la normale 1991-2020. Les écoulements enregistrés à la normale 1991-2020 sont plus importants que ceux de la normale 1971-2000 et 1981-2010. Cette augmentation peut être due à deux facteurs, la faible reprise de la pluviométrie constatée dans la zone au cours de la décennie 2011-2020 et la dégradation du couvert végétal. La réduction de la couverture végétale fait augmenter les lames d'eau écoulées dans les bassins versants, ce qui explique l'amélioration des écoulements sur les différents bassins versants. Ces résultats s'inscrivent dans les mêmes ordres de grandeurs que ceux obtenus par Nascimento (1995), Kouadio (2011), Koua *et al.* (2019). La tendance positive de l'écoulement constatée dans le comportement hydrologique des bassins a aussi été mise en évidence par les travaux de plusieurs auteurs avec des modèles pluie-débit (Kuczera, 1987 ; Brandt *et al.*, 1988 ; Cornish, 1993 ; Ouédraogo *et al.*, 1998). Des études portant sur les

bilans hydrologiques réalisées par Cosandey (1993) et Didon-Lescot (2023) ont relevé qu'après une coupe à blanc de la couverture végétale du bassin versant de la Latte (France) de 1987 à 1989, l'accroissement des écoulements annuels est estimé entre 10 et 15%. Mahe *et al.* (2015) ont observé dans leurs études que les pluies ont diminué en Afrique de l'Ouest depuis 35 ans, entraînant une diminution des écoulements dépassant parfois plus de 60%. Cette baisse amplifiée des écoulements s'explique par une diminution du débit de base, provoquée par le cumul des déficits pluviométriques annuels. Toute l'Afrique sub-saharienne est concernée, à l'exception du nord des isohyètes 700–800 mm annuels, où les écoulements des rivières sahéliennes augmentent depuis 1970.

L'analyse des valeurs de l'indice hydrologique normalisé (IHN) a révélé que le bassin versant du Sassandra a connu un important déficit hydrologique après 1970 avec des indices négatifs de 1970 à 1980 à Piébli et à Kahin. Ces intensités sont caractérisées par des sécheresses de types modérés à Kahin et Piébli. Ces résultats sont confirmés par les résultats des recherches effectuées en Afrique de l'Ouest (Faye, 2017). À l'Ouest de la Côte d'Ivoire, les études de N'Go *et al.* (2017) ont également mentionné une baisse de la pluviométrie sur la période de 1981-2010. Selon ces auteurs la sécheresse qu'a connue l'Afrique de l'ouest dans les années 1980 a entraîné des baisses des niveaux des retenus d'eau. Eu égard aux résultats de cette étude, l'intensité de la sécheresse s'est beaucoup accentuée dans les régimes tropicaux de transition et équatorial de transition atténué. En effet, la longue période de sécheresse hydrologique dans le bassin versant est attribuée à l'effet cumulé des fréquences des longues années de sécheresse : 1980, 1990. Ces résultats sont en accord avec ceux de Servat *et al.* (1999) qui ont montré que les déficits des débits moyens annuels sont rarement inférieurs à 30 % et parfois supérieurs à 55 %, voire 60 %. Toutefois, contrairement aux études de N'Go *et al.* (2017), les résultats obtenus dans cette thèse ont souligné une hausse des écoulements au cours de la décennie 1981-1990. La cause de cette hausse de débits pourrait être l'augmentation de la pluviométrie au cours des dernières décennies. La tendance à la croissance de l'écoulement sur les bassins en Afrique de l'Ouest a aussi été mise en évidence par les travaux de plusieurs auteurs par utilisation de modèles pluie-débit (Ouedraogo *et al.*, 1998 ; Kouakou, 2011). Il convient de noter que cette recrudescence des écoulements serait liée à la mise à nu des sols du bassin qui s'est accentuée dans les années 1980 (Cosandey *et al.*, 2000).

Conclusion partielle

Cette étude a permis d'analyser la variabilité climatique et hydrologique observée durant les cinq dernières décennies dans le bassin versant du Sassandra à Buyo en Côte d'Ivoire. Sur l'ensemble du bassin, des conditions prolongées de déficits pluviométriques et hydrométriques depuis les années 1970 ont été mises en évidence. Cette sécheresse s'est amplifiée pendant les années 1980 et 2000. Les régimes hydrologiques ont également subi de profondes modifications qui se sont manifestées par de fortes fluctuations des écoulements sur le bassin versant. En effet, la baisse de la pluviométrie a eu pour effet, la diminution des débits des cours d'eau du bassin. Ainsi, depuis les années 1970, un effondrement des débits des cours d'eau est observé. L'incidence du déficit pluviométrique observé est manifesté sur la disponibilité des ressources en eau. La sécheresse météorologique se trouve ainsi amplifiée dans les écoulements.

L'analyse des normales et décennales pluviométriques a permis de comprendre l'évolution de la pluie dans la zone d'étude. Ces résultats ont pu confirmer que la zone d'étude a subi de fortes perturbations pluviométriques traduites par la baisse des hauteurs de pluie sur l'ensemble du bassin versant. Les résultats ont pu montrer que la décennie 2011-2020 est caractérisée par un retour de la pluviométrie vers la normale.

Les résultats sur les indices climatiques montrent une situation caractérisée par la sécheresse de type léger dans la zone d'étude provoquée par une tendance à la baisse des hauteurs de pluies.

Concernant l'hydrologie de la zone d'étude, les résultats montrent que le déficit hydrologique observé à la décennie 1971-1980 a causé des sécheresses de type modéré.

Chapitre 6 : Caractérisation hydro-climatique future du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Introduction partielle

Ce chapitre présente l'analyse des changements climatiques futurs et leurs impacts hydrologiques sur le bassin versant du fleuve Sassandra. Il débute par la sélection des modèles climatiques les plus adaptés à la zone d'étude, évalués notamment à l'aide de diagrammes de Taylor, puis identifie les modèles retenus pour les simulations. Les sorties de ces modèles sont corrigées afin d'améliorer leur fiabilité, avant d'estimer les évolutions futures des variables climatiques, telles que les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. Le chapitre s'attache ensuite à évaluer les conséquences hydrologiques de ces changements climatiques, en simulant les écoulements et en analysant l'impact sur le régime des débits du bassin. La discussion synthétise les principaux résultats et met en évidence leurs implications pour la gestion de l'eau et la performance du barrage hydroélectrique de Buyo.

6.1. Modèles climatiques adaptés à la zone d'étude

6.1.1. Diagramme de Taylor

Les résultats de la comparaison statistique de la distribution intra-saisonnière du cumul des précipitations simulées par les modèles sont présentés par les figures 31, 32 et 33.

- **Station d'Odienné**

Rappelons que le RCA4 est un modèle régional obtenu à partir de plusieurs modèles globaux. Sont appellation est donc fonction du modèle global source duquel il dérive via une réduction d'échelle. Au niveau de la pluviométrie, l'analyse de la figure 31a permet de faire les observations suivantes : Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes faibles (RMSE compris entre 0,75 et 1,4), des erreurs absolues moyennes faibles (AAE compris entre 0,25 et 0,95), et des corrélations (R compris entre 0,92 et 0,99) proches de 1. En d'autres termes, les modèles ont des simulations proches des observations de la station d'Odienné. Statistiquement, tous les modèles climatiques régionaux ont de bonnes performances à l'exception des modèles MPI qui présentent des RMSE élevées ($RMSE_{MPI} = 1,2$ et $RMSE_{NOAA} = 1,4$) et du modèle CSIRO qui montre un écart-type faible comparé aux autres modèles ($R_{CSIRO} = 0,92$).

Au niveau des températures, l'analyse de la figure 31b permet de faire les observations suivantes. Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes faibles ($0,5 \leq RMSE \leq 1$), des erreurs absolues moyennes faibles ($0,3 \leq AAE \leq 1,1$), et des corrélations ($0,80 \leq R \leq 0,97$) proches de 1, en d'autres termes, les modèles ont des simulations proches des observations de la station d'Odienné. Statistiquement, tous les dix (10) modèles climatiques globaux ont de bonnes performances avec les observations même si la plupart des modèles (ICHEC, MIROC, MOHC, NOAA, CCCMA, CSIRO et CNRM) présentent de faibles corrélations.

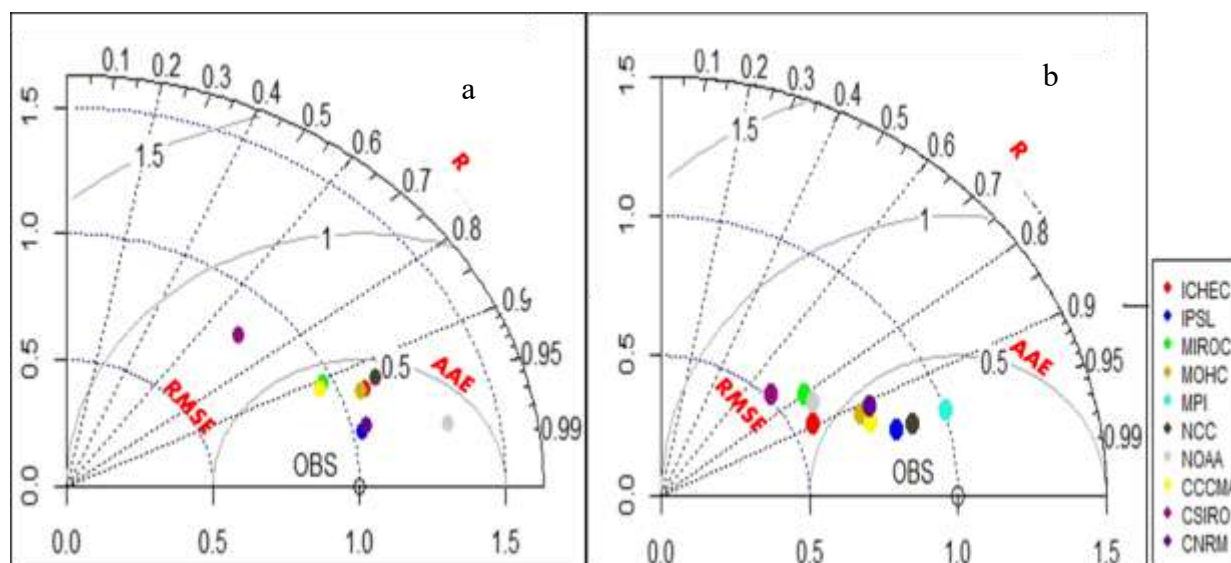


Figure 31 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station d'Odienné

• Station de Daloa

Au niveau de la pluviométrie, l'analyse de la figure 32a permet de faire les observations suivantes. Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes comprises dans la tranche $0,75 \leq RMSE \leq 2,5$, des erreurs absolues moyennes comprises dans la tranche $0,75 \leq AAE \leq 1,9$, et des corrélations comprises entre $0,85 \leq R \leq 0,98$. Statistiquement, les modèles ICHEC, IPSL, MOHC, NCC et CNRM ont de bonnes performances avec les observations de la station de Daloa du fait de leur bonne corrélation ($R \geq 0,95$).

Au niveau des températures, l'analyse de la figure 32b permet de faire les observations suivantes. Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes comprises dans la tranche $0,99 \leq RMSE \leq 2,5$, des erreurs absolues moyennes comprises dans la tranche $0,4 \leq AAE \leq 1,4$ et des corrélations $0,40 \leq R \leq 0,97$. Statistiquement, seuls les modèles MOHC, NCC et CSIRO présentent de bonnes corrélations ($R \geq 0,92$).

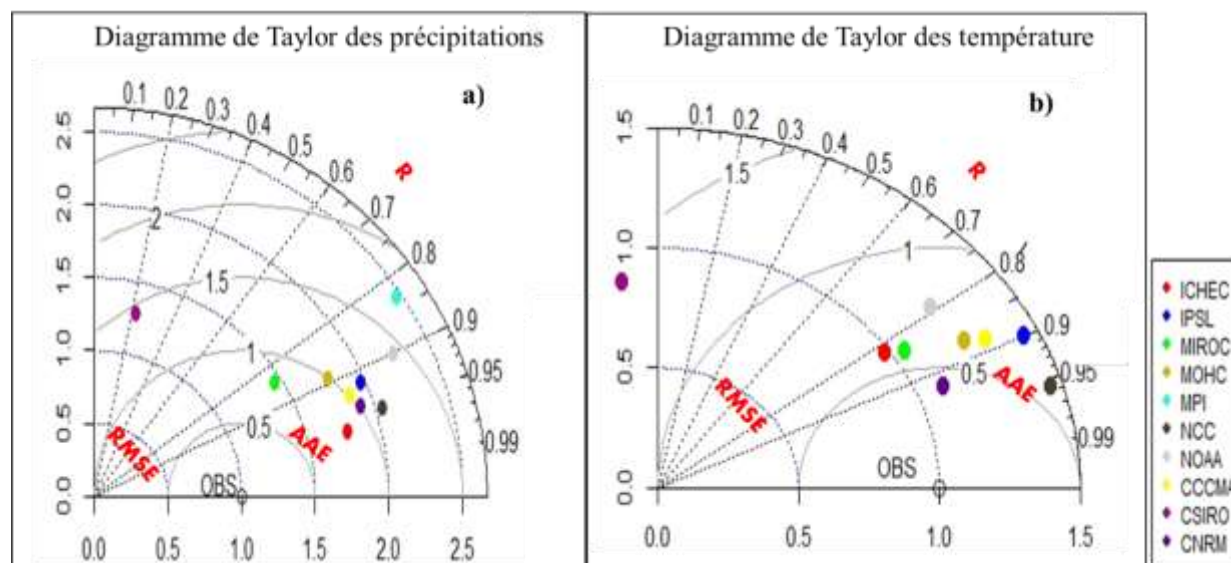


Figure 32 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station de Daloa

• Station de Man

Au niveau de la pluviométrie, l'analyse de la figure 33a permet de faire les observations suivantes. Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes comprises dans la tranche $0,79 \leq RMSE \leq 1,79$, des erreurs absolues moyennes comprises dans la tranche $0,49 \leq AAE \leq 1,29$ et des corrélations comprises entre $0,81 \leq R \leq 0,97$. Statistiquement, les modèles ICHEC, IPSL, NCC et CNRM du fait de leur bonne corrélation ($R \geq 0,97$) ont de bonnes performances avec les observations de la station de Man.

Au niveau des températures, l'analyse de la figure 33b permet de faire les observations suivantes. Les modèles présentent des erreurs quadratiques moyennes comprises dans la tranche $0,8 \leq RMSE \leq 1,75$, des erreurs absolues moyennes comprises dans la tranche $0,5 \leq AAE \leq 1,3$ et des corrélations comprises dans l'intervalle suivant $0,70 \leq R \leq 0,97$. Statistiquement, seuls les modèles IPSL et CNRM ($R = 0,80$) et le modèle NCC ($R = 0,97$) qui présentent de bonnes corrélations ($R \geq 0,92$).

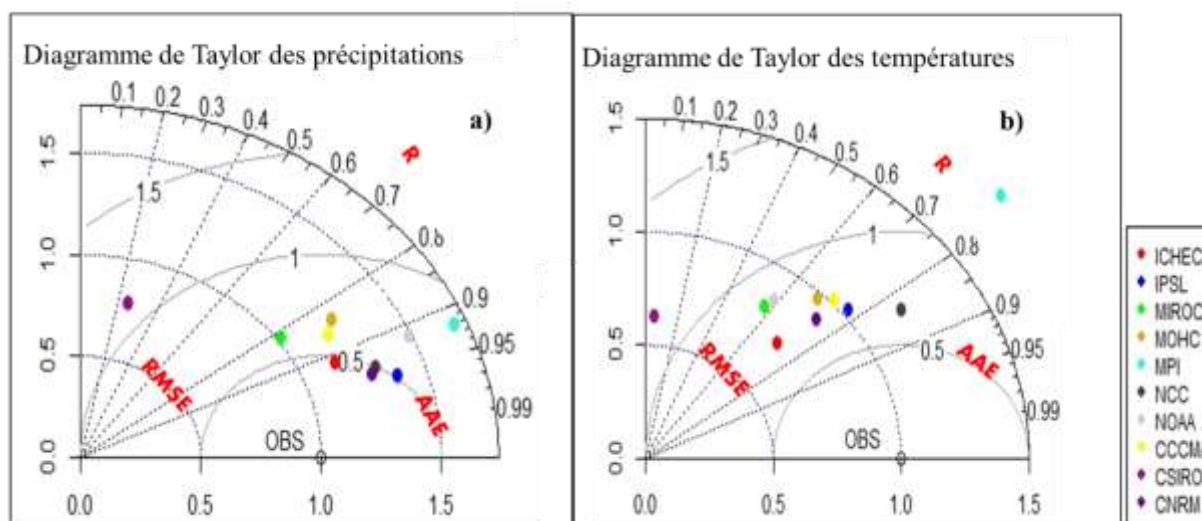


Figure 33 : Diagramme de Taylor des paramètres climatiques de la station de Man

6.1.1.2. Cycle saisonnier des paramètres climatiques

• Station d'Odienné

La figure 34 présente le cycle saisonnier des paramètres climatiques à la station d'Odienné.

Au niveau des précipitations, le régime unimodal est respecté par les modèles IPSL, NOAA, CNRM et MPI. Toutefois, les modèles NCC et IPSL simulent bien le pic saisonnier qui est observable dans le mois d'août.

Concernant les températures, les dix (10) modèles reproduisent les mêmes allures à l'exception des pics qui montrent des décallages. Cependant, les modèles CCCma, MPI, IPSL, NOAA, ICHEC, CNRM et MOHC simulent mieux les pics de températures.

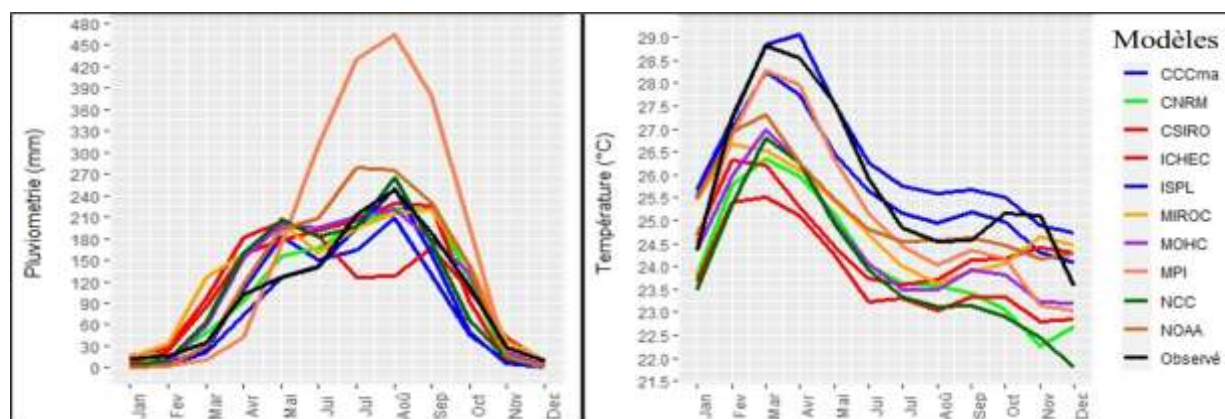


Figure 34 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station d'Odienné

• Station de Daloa

La figure 35 présente le cycle saisonnier des paramètres climatiques à la station de Daloa. Au niveau des précipitations, le régime bimodal est respecté par les modèles NCC, CNRM, ICHEC, MOHC et CCCma. En termes de cycle saisonnier, les modèles NCC, ICHEC et CCCma simulent mieux les pics saisonniers d'avril et de septembre, à l'exception du modèle NCC qui ne simule pas le pic de septembre.

Concernant les températures, les dix (10) modèles ont les mêmes tendances à l'exception des pics qui ne co  cident pas. Cependant, les modèles ICHEC, NCC et MOHC simulent mieux les températures.

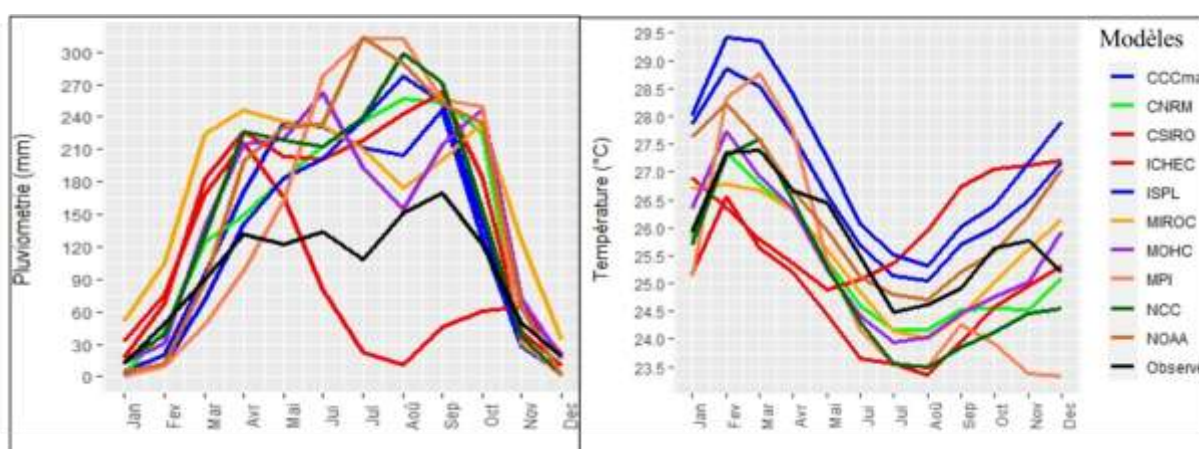


Figure 35 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station de Daloa

• Station de Man

La figure 36 présente le cycle saisonnier des paramètres climatiques à la station de Man. Au niveau des précipitations, le régime unimodal est respecté par les modèles IPSL, NCC, CNRM et MPI. A l'échelle saisonnière, les modèles NCC et IPSL simulent mieux le pic saisonnier du mois d'août. Pour ce qui est des températures, les dix (10) modèles ont les mêmes tendances à l'exception des pics qui ne co  cident pas. Cependant, les modèles CCCma, IPSL et NCC simulent mieux les pics de températures.

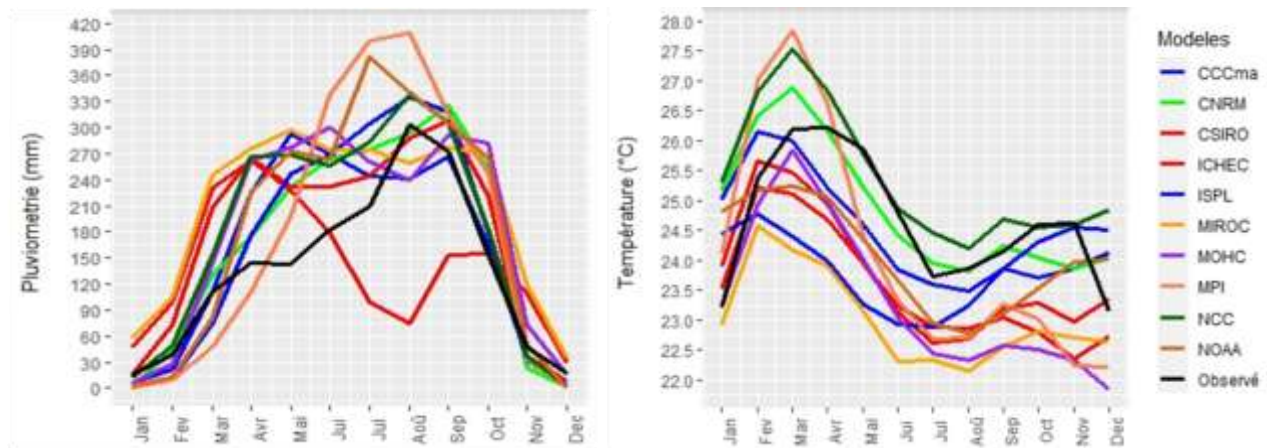


Figure 36 : Cycle saisonnier des précipitations et des températures moyennes mensuelles des modèles utilisés à la station de Man

6.1.2. Modèles retenus

Après l'analyse des diagrammes de Taylor couplée des cycles saisonniers des différents modèles comparés aux observations, les figures 37 et 38 permettent d'isoler les modèles qui ont montré de bonnes performances.

■ Précipitations

Au niveau des précipitations, le régime saisonnier (Figure 37) confirme que les modèles IPSL et NCC reproduisent mieux le régime climatique d'Odienné et de Man, à l'exception des biais qui sont assez remarquables. À Daloa, ce sont les modèles ICHEC et NCC qui représentent mieux le cycle saisonnier des précipitations. On note néanmoins des écarts à la surestimation des valeurs simulées.

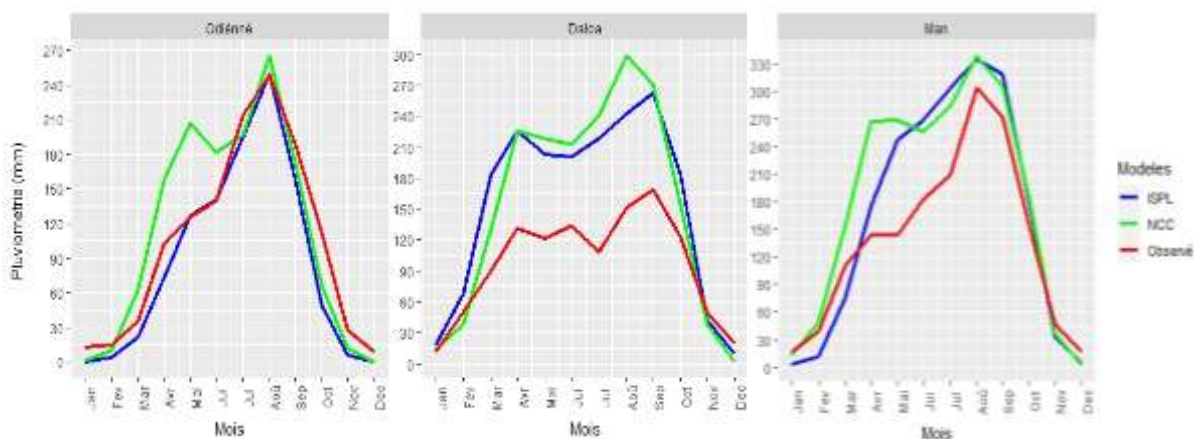


Figure 37 : Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles simulées *et* observées

■ Températures

Au niveau des températures (Figure 38), les deux modèles simulent mieux les pics au cours de l'année. Néanmoins, on note un décalage entre les valeurs observées et simulées.

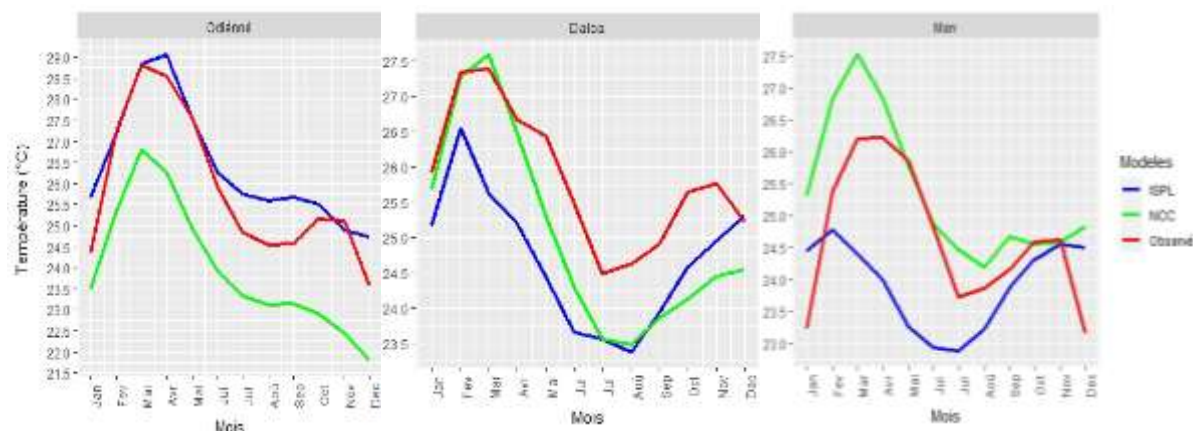


Figure 38 : Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles simulées et observées

L'analyse croisée du cycle saisonnier et des diagrammes de Taylor des différents paramètres climatiques a permis de retenir les modèles contenus dans le tableau XVII.

Tableau XVII : Modèles Climatiques retenus par zone climatique

Station	MCRs RCA4 Choisis	Types de stations
Daloa	RCA4-ICHEC, RCA4-NCC	Synoptique
Man	RCA4-IPSL, RCA4-NCC	Synoptique
Odienné	RCA4-IPSL, RCA4-NCC	Synoptique

6.2. Potentiels changements du climat futur

6.2.1. Correction des sorties de modèles

Les biais estimés entre les pluies et les températures observées et simulées sont présentés dans les tableaux XVIII et XIX.

L'analyse des biais des précipitations (Tableau XVIII) montre qu'au cours des mois secs (Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars), les modèles sous-estiment largement les observations. A l'inverse, ils les surestiment pendant les mois humides (Avril, Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre).

Concernant les biais de températures (Tableau XIX), on note des erreurs de simulation positives pour le modèle NCC toute l'année. Le modèle surestime les températures pour les villes d'Odienné et Man en novembre et décembre.

Compte tenu de ces résultats, une correction du biais est primordiale afin d'améliorer la qualité des simulations futures.

Tableau XVIII : Biais estimés entre pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005

Mois	Daloa		Odienné		Man	
	NCC	ICHEC	NCC	ICHEC	NCC	ICHEC
J	-80,8	-58,9	-99,2	-81,5	-100	-94
F	-71,1	-56,3	-90,5	-53,3	-93,7	-86,5
M	-12,6	10,9	-63,8	7,2	-81,4	-48
A	50,7	44,9	-15,9	85,5	-58	14,2
M	105,7	71,7	16,8	118,4	-26,5	53,4
J	71,6	70,3	6,9	56,6	-35,9	5,1
J	94,5	101,6	19,6	33,1	-15,7	-12,3
A	100,5	95,5	35,2	49,5	-18,5	-14,2
S	5,4	53,4	9,5	26	-54,7	-42,6
O	-23,9	-14,1	-39,2	-22,7	-63,5	-47,9
N	-80	-76,9	-85,1	-76,9	-92,4	-86,8
D	-99,9	-92,1	-84	-99,2	-96,2	-100

Tableau XIX : Biais estimés entre les températures observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005

Mois	Daloa		Odienné		Man	
	NCC	ICHEC	NCC	ICHEC	NCC	ICHEC
J	-0,2	-0,8	1,3	-0,9	2,1	0
F	-0,1	-0,8	-0,1	-1,9	1,4	-0,5
M	0,2	-1,8	0	-2	1,3	-0,4
A	-0,2	-1,5	0,5	-2,3	0,6	-1,2
M	-1,1	-2	0	-2,6	-0,1	-1,8
J	-1,2	-1,8	0,3	-2	0,1	-1,8
J	-0,9	-0,9	0,9	-1,5	0,7	-1,3
A	-1,1	-1,3	1	-1,4	0,3	-1,5
S	-1,1	-1	1,1	-1,4	0,5	-1,6
O	-1,5	-1,1	0,4	-2,2	0	-2,1
N	-1,3	-0,8	-0,2	-2,7	0	-2,3
D	-0,7	0,1	1,2	-1,8	1,7	-1,3

- **Correction des précipitations**

La figure 39 montre que la correction des biais a amélioré de manière significative les sorties des pluies. Les grandes tendances climatiques sont représentées. Cependant, de légers écarts dans les données corrigées et observées sont perceptibles. Les écarts les plus significatifs se situent au niveau de la simulation du modèle NCC à la station de Daloa (RCP 8.5). Le modèle NCC simule moins bien les grandes tendances climatiques. On note un décalage d'un mois durant la période pluvieuse.

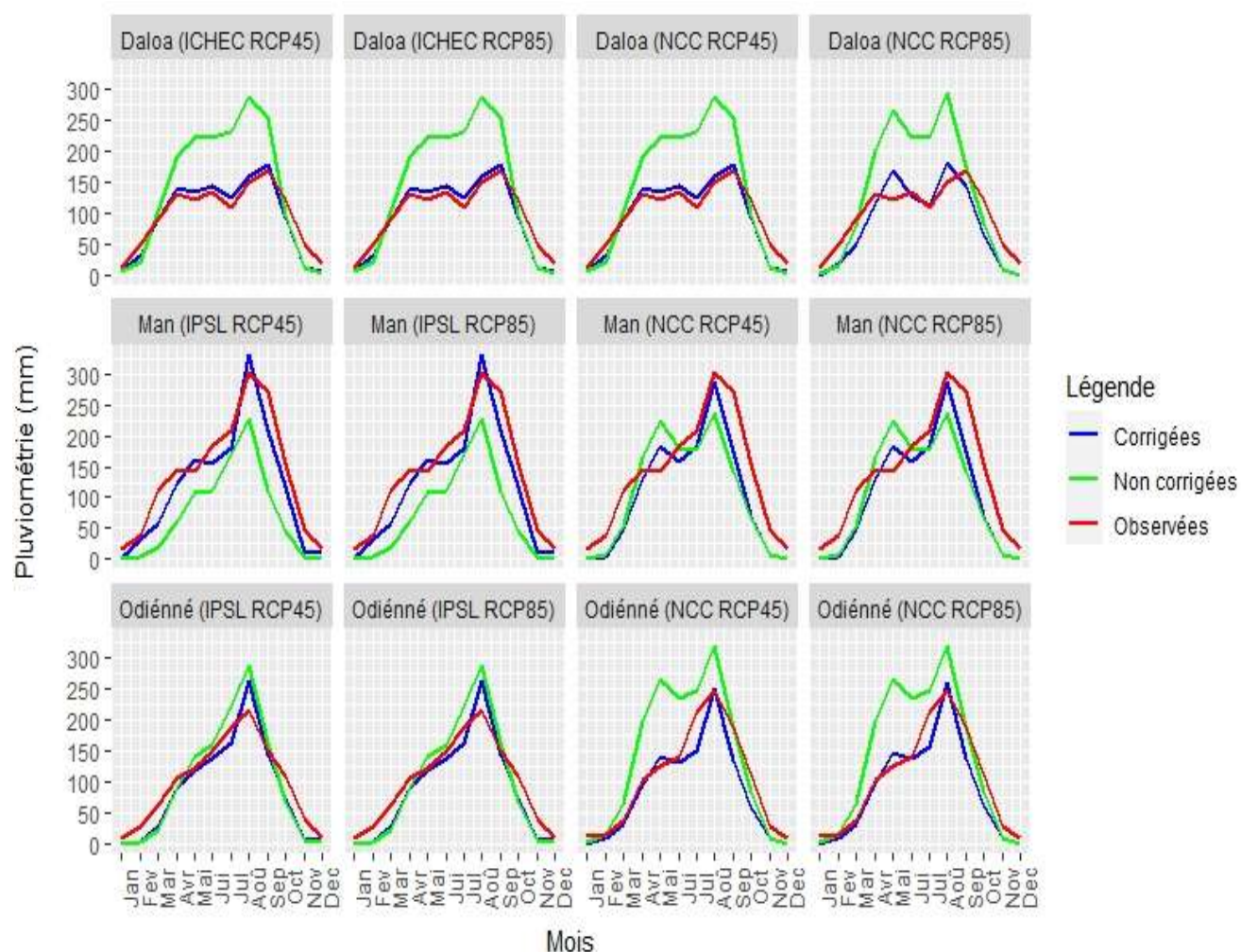


Figure 39 : Sorties de pluies corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping)

- **Correction des températures**

La figure 40 montre que les sorties de températures sont bien simulées par les modèles climatiques régionaux. Aucune observation majeure n'est à relever. Les données corrigées peuvent être directement utilisées.

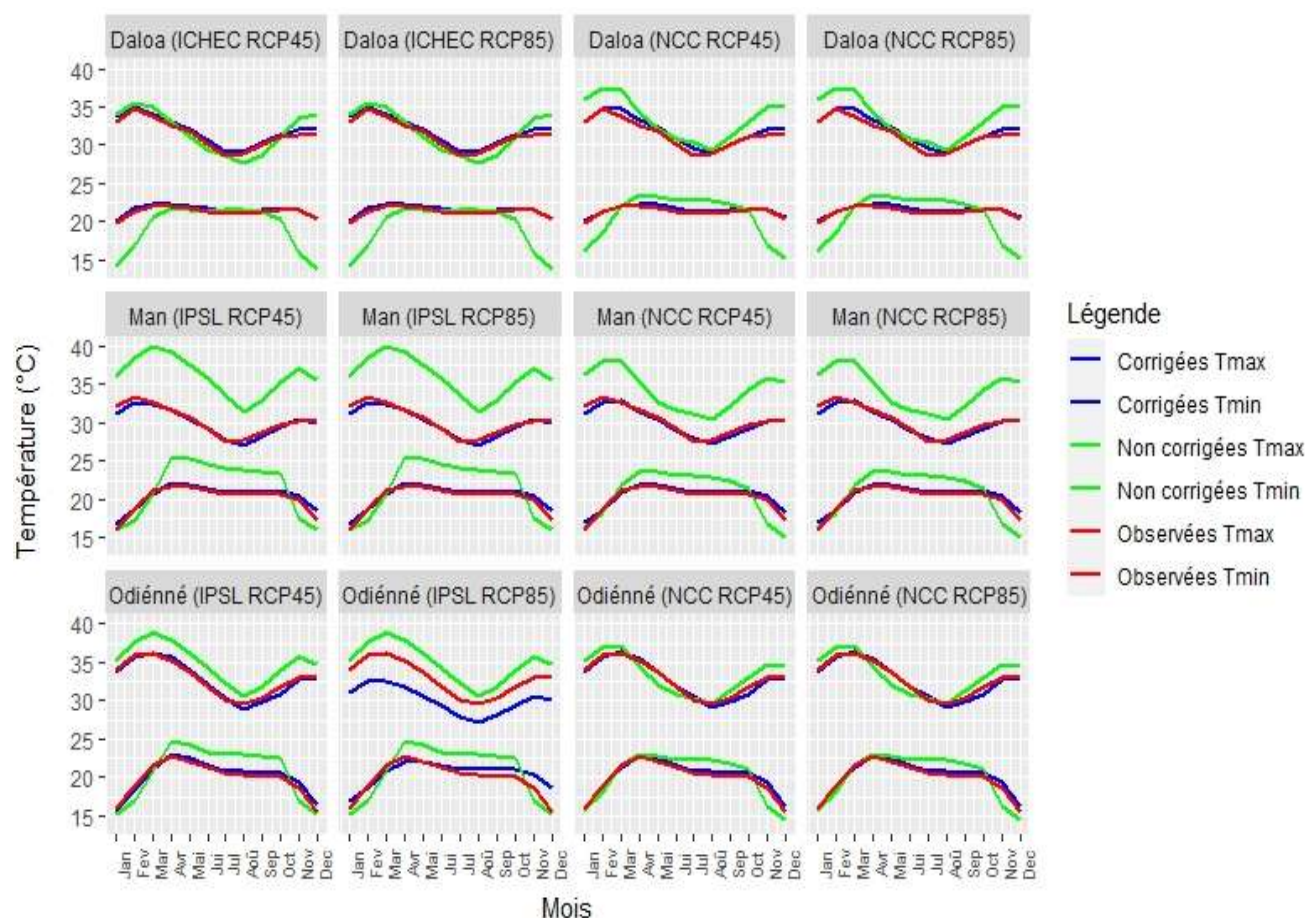


Figure 40 : Sorties des températures corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping)

6.2.2. Estimation des changements futurs

L'analyse des figures 41 et 42, 43 et 44 indiquent des spécificités observées au niveau des scénarii, des horizons et des paramètres de précipitations et de températures. Ces spécificités ont permis de mettre en évidence certains aspects du climat futur par comparaison aux observations de la période historique ou période de contrôle des modèles (1981-2005).

6.2.2.1. Analyse des scénarii climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

Pour mieux apprécier les informations contenues dans les figures 41 et 42 ainsi que les tableaux XX et XXI, l'analyse a été compartimentée en fonction des scénarii, des paramètres climatiques et des horizons de l'étude.

❖ Cas du scénario RCP 4.5

• Evolution de la pluviométrie

La figure 41 montre la variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 4.5. À Daloa, à l'horizon 2030, le modèle ICHEC fait apparaître une baisse de 2,4%, tandis que le modèle NCC laisse apparaître une hausse de 4,2%. Pour 2050, les cumuls augmentent respectivement de 4,6% et de 12%. À Man, les projections indiquent pour 2030 une diminution de 20,8% selon IPSL et de 11% selon NCC, avec des baisses de 18,8% et 11,4% à l'horizon 2050. À Odiénné, les valeurs pour 2030 s'élèvent à 40,5% pour IPSL et à 59,1% pour NCC, et pour 2050, les hausses atteignent 36,3% et 61,7%.

• Evolution des températures

La figure 42 illustre la variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP 4.5. À Daloa, à l'horizon 2030, les modèles ICHEC et NCC indiquent des hausses de 3°C et 3,7°C, qui atteignent respectivement 3,7°C et 4,4°C pour 2050. À Man, les projections montrent une augmentation de 1,6°C selon IPSL et de 3,1°C selon NCC pour 2030, avec des hausses de 2,3°C et 3,6°C à l'horizon 2050. À Odiénné, les valeurs s'élèvent à 2°C pour IPSL et 2,7°C pour NCC en 2030, et à 2,6°C et 3,2°C pour 2050 (Tableau XX).

Tableau XX : Projections climatiques selon le scénario RCP 4.5

	Daloa		Man		Odiénné		Horizons
	ICHEC	NCC	IPSL	NCC	IPSL	NCC	
Précipitations	-2,4	+4,2	-20,8	-11	+40,5	+58,1	2030
	+4,6	+12	-18,8	-11,4	+36,3	+61,7	2050
Températures	3	3.7	1.6	3.1	2	2.7	2030
	3.7	4.4	2.3	3.6	2.6	3.2	2050

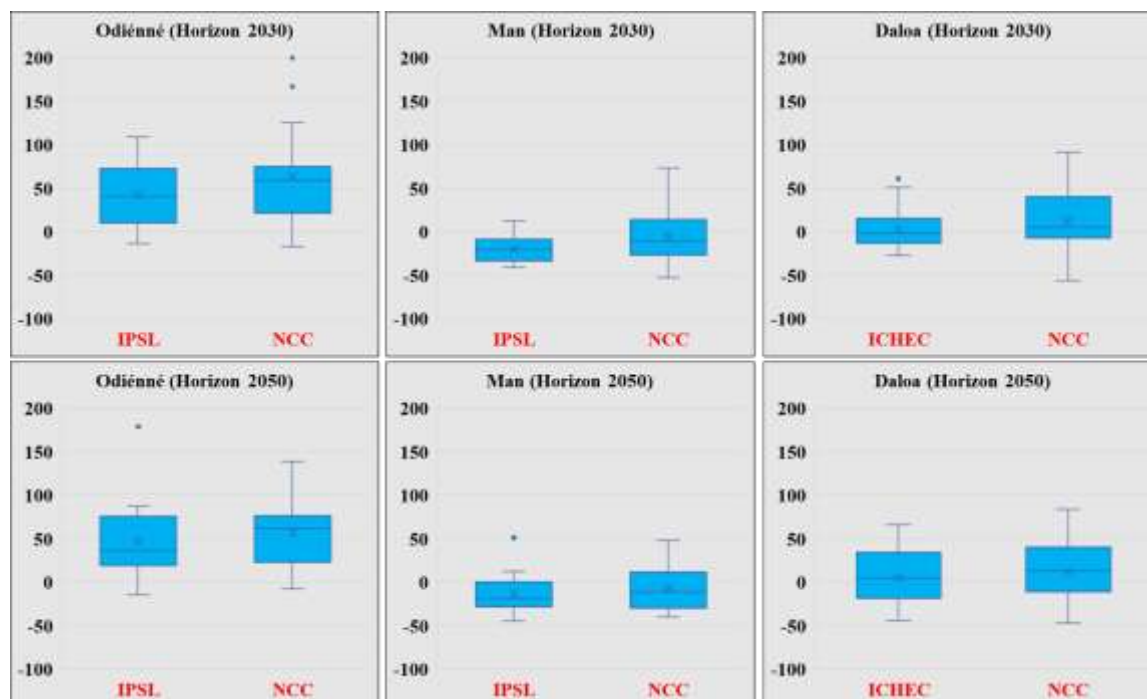


Figure 41 : Variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 4.5

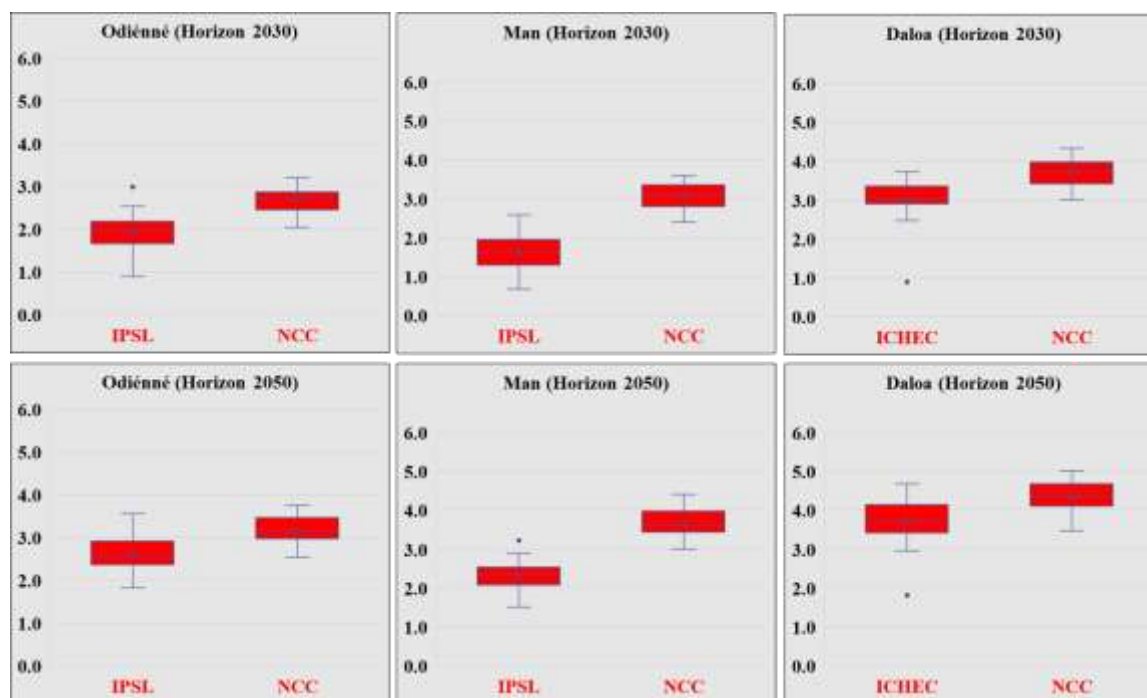


Figure 42 : Variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP 4.5

❖ Cas du scénario RCP 8.5

• Précipitations

La figure 43 présente la variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 8.5. À Daloa, les deux modèles s'accordent sur une augmentation des précipitations, avec des hausses de 4,2 % pour ICHEC et de 1,4 % pour NCC à l'horizon 2030, qui atteignent 17,2 % et 36,9 % respectivement pour 2050. À Man, les projections pour 2030 indiquent des baisses de 19,4 % selon IPSL et de 13,2 % selon NCC. Pour 2050, les modèles divergent : IPSL signale une baisse de 7,5 %, tandis que NCC indique une hausse de 17 %. À Odiénné, les valeurs pour 2030 diffèrent également, avec une hausse de 43,8 % pour IPSL et une baisse de 17,4 % pour NCC. À l'horizon 2050, les deux modèles s'accordent sur une augmentation, atteignant 53,5 % pour IPSL et 73,3 % pour NCC.

• Températures

La figure 44 illustre la variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP 8.5. À Daloa, à l'horizon 2030, les modèles ICHEC et NCC indiquent des hausses de 3,4°C et 4,6°C, qui atteignent respectivement 4,4°C et 5°C pour 2050. À Man, les augmentations s'élèvent à 1,8°C pour IPSL et 3,7°C pour NCC en 2030, puis à 4,1°C et 3,2°C à l'horizon 2050. À Odiénné, les valeurs enregistrées pour 2030 sont de 2,1°C pour IPSL et 2,2°C pour NCC, et pour 2050, elles s'élèvent à 3,3°C et 4°C (Tableau XXI).

Tableau XXI : Projections climatiques selon le scénario RCP 8.5

	Daloa		Man		Odiénné		Horizons
	ICHEC	NCC	IPSL	NCC	IPSL	NCC	
Précipitations	+4,2	+1,4	-19,4	-13,2	+43,8	-17,4	2030
	+17,2	+36,9	-7,5	+17	+53,5	+73,3	2050
Températures	3,4	4,6	1,8	3,7	2,1	2,2	2030
	4,4	5	4,1	3,2	3,3	4	2050

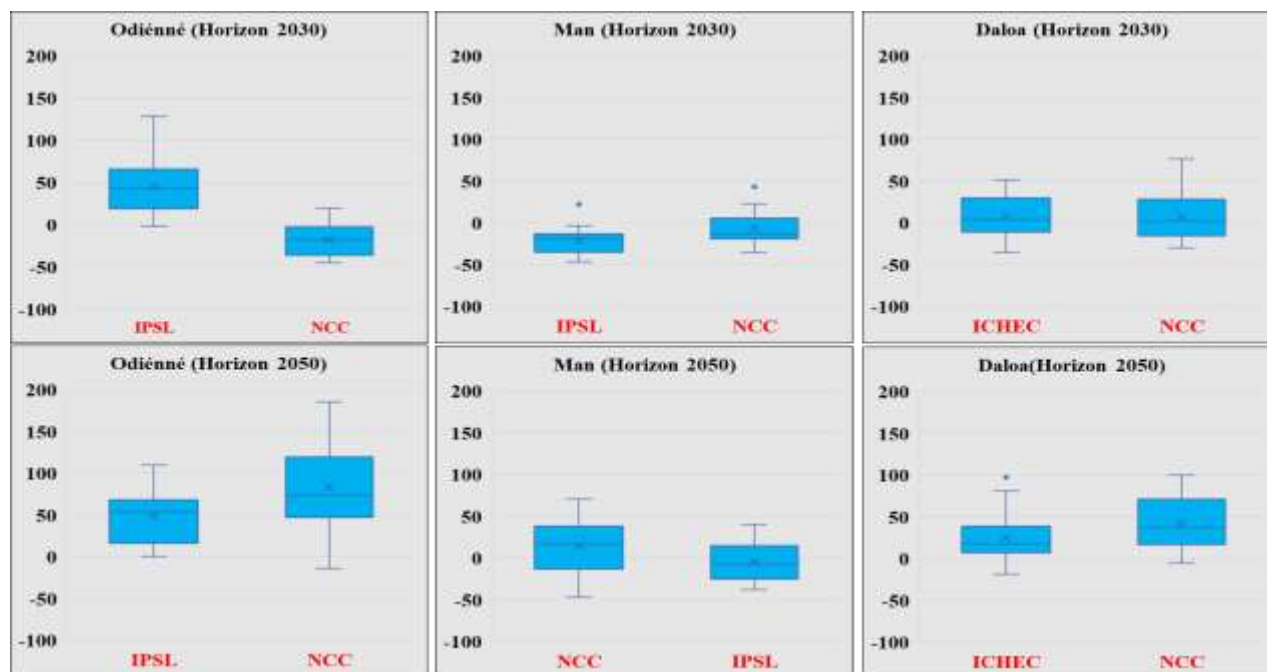


Figure 43 : Variation du cumul annuel des précipitations selon le scénario RCP 8.5

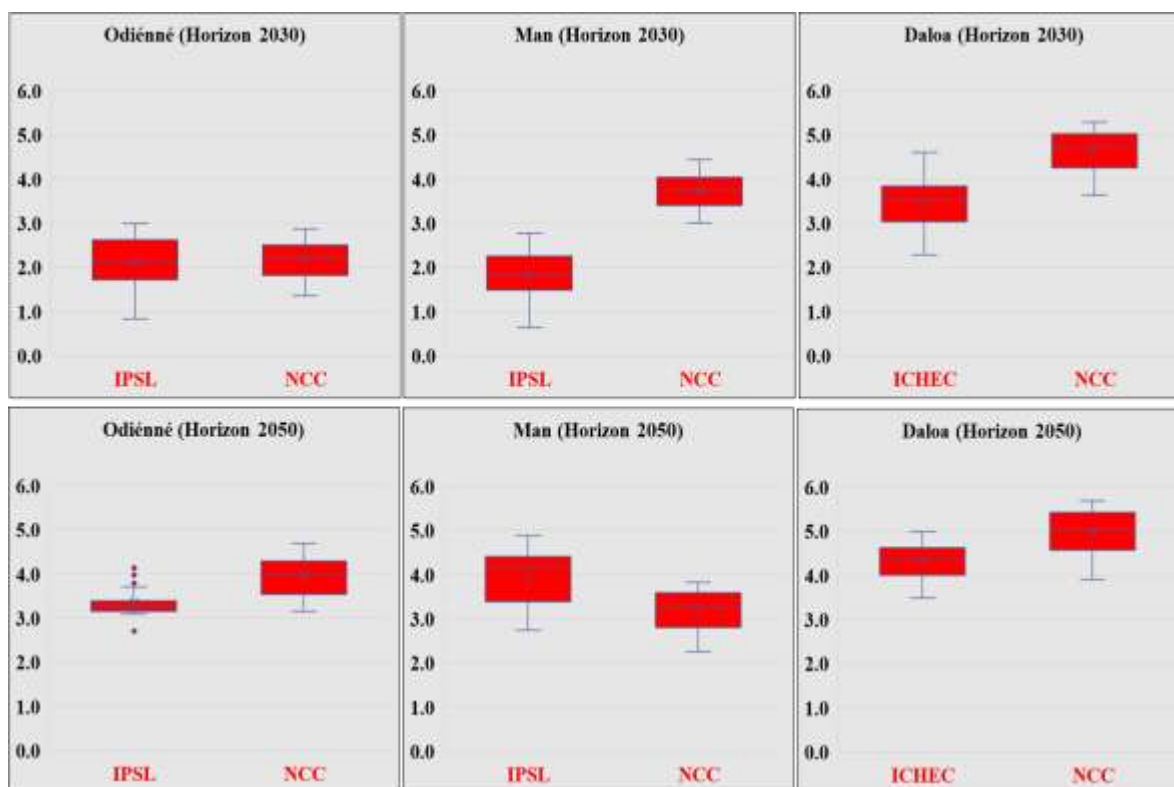


Figure 44 : Variation des températures moyennes annuelles selon le scénario RCP8.5

6.2.2.2. Analyse interannuelle de la prédiction climatique

❖ Hauteurs de pluies attendues sur la période 2021-2060

Les figures 45, 46 et 47 présentent l'évolution de la pluviométrie moyenne interannuelle simulée par les modèles climatiques régionaux en comparaison à la moyenne de la période de référence (1981-2005) respectivement dans les zones de Daloa, Man et Odienné.

L'analyse des figures indique que les hauteurs de pluies connaîtront de fortes fluctuations.

▪ Zone de Daloa

Avec le modèle ICHEC, le scénario RCP 4.5 indique une pluviométrie maximale de 1858,3 mm en 2051, une valeur minimale de 627,4 mm en 2050 et une moyenne de 1166 mm (Figure 45a). Pour le scénario RCP 8.5, la pluie maximale atteint 2211,7 mm en 2044, la minimale 727,7 mm en 2037 et la moyenne 1317,1 mm (Figure 45b).

Pour le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une pluie maximale de 2980,4 mm en 2060, une valeur minimale de 856,8 mm en 2041 et une moyenne de 1666,2 mm (Figure 45c). Pour le scénario RCP 8.5, la pluviométrie maximale atteint 2840,5 mm en 2044, la minimale 727,7 mm en 2037 et la moyenne 1317,1 mm (Figure 45d).

Comparativement à la moyenne de la période de référence, qui s'établit à 1122,3 mm pour ICHEC et 994,8 mm pour NCC, la zone de Daloa connaîtra des hauteurs de pluie supérieures à la normale selon les deux scénarios et les deux modèles.

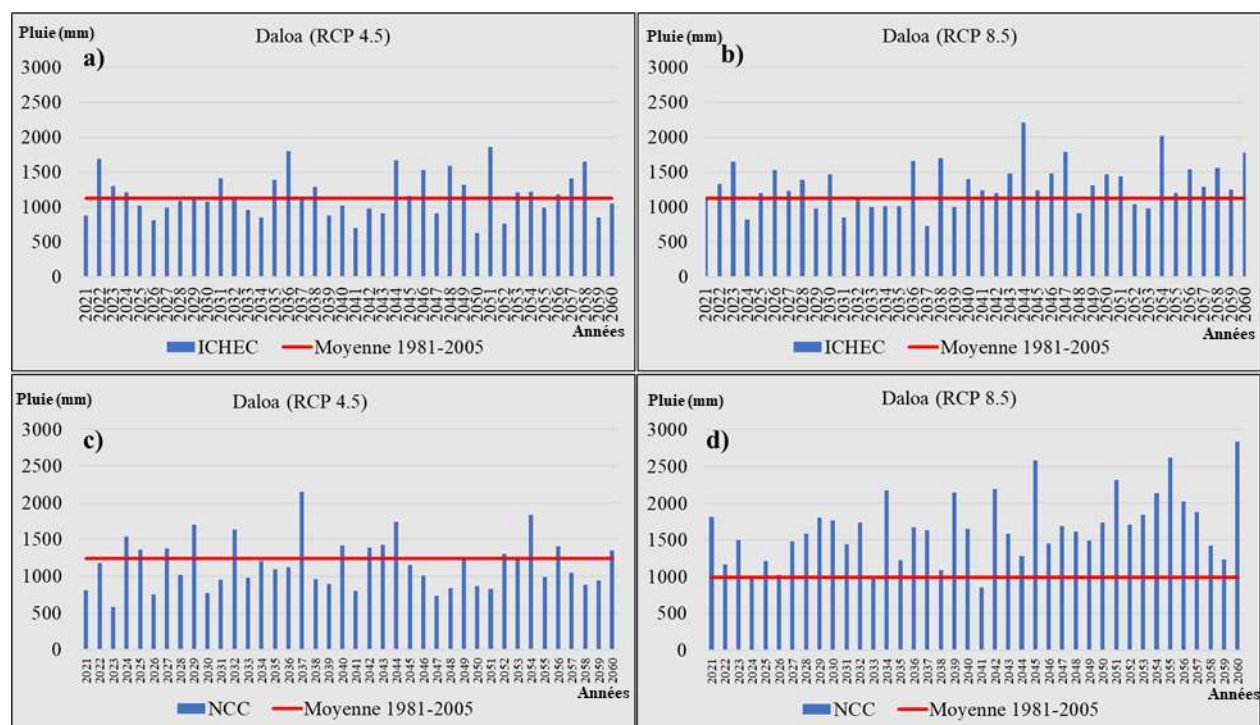


Figure 45 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone de Daloa de 2021 à 2060

▪ Zone de Man

Le modèle IPSL indique pour le scénario RCP 4.5 une pluviométrie maximale de 2090,4 mm en 2043, une valeur minimale de 754,9 mm en 2055 et une moyenne de 1151,2 mm (Figure 46a). Pour le scénario RCP 8.5, la pluie atteint 1937,1 mm au maximum en 2057, 728,9 mm au minimum en 2041 et une moyenne de 1189,7 mm (Figure 46b).

Selon le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une pluie maximale de 2153 mm en 2037, une valeur minimale de 577,1 mm observée en 2023 et une moyenne de 1164 mm (Figure 46c). Pour le scénario RCP 8.5, les hauteurs maximales atteignent 2116,6 mm en 2053, les minimales 801,6 mm en 2038 et la moyenne 1319,1 mm (Figure 46d).

Comparée à la moyenne de la période de référence, qui s'élève à 1386,1 mm pour IPSL et 1244,3 mm pour NCC, la zone de Man connaîtra des pluies relativement faibles selon le modèle IPSL pour les deux scénarios. Selon NCC, seule la moyenne du scénario RCP 4.5 reste inférieure à la période de référence, tandis que le scénario RCP 8.5 dépasse largement cette moyenne.

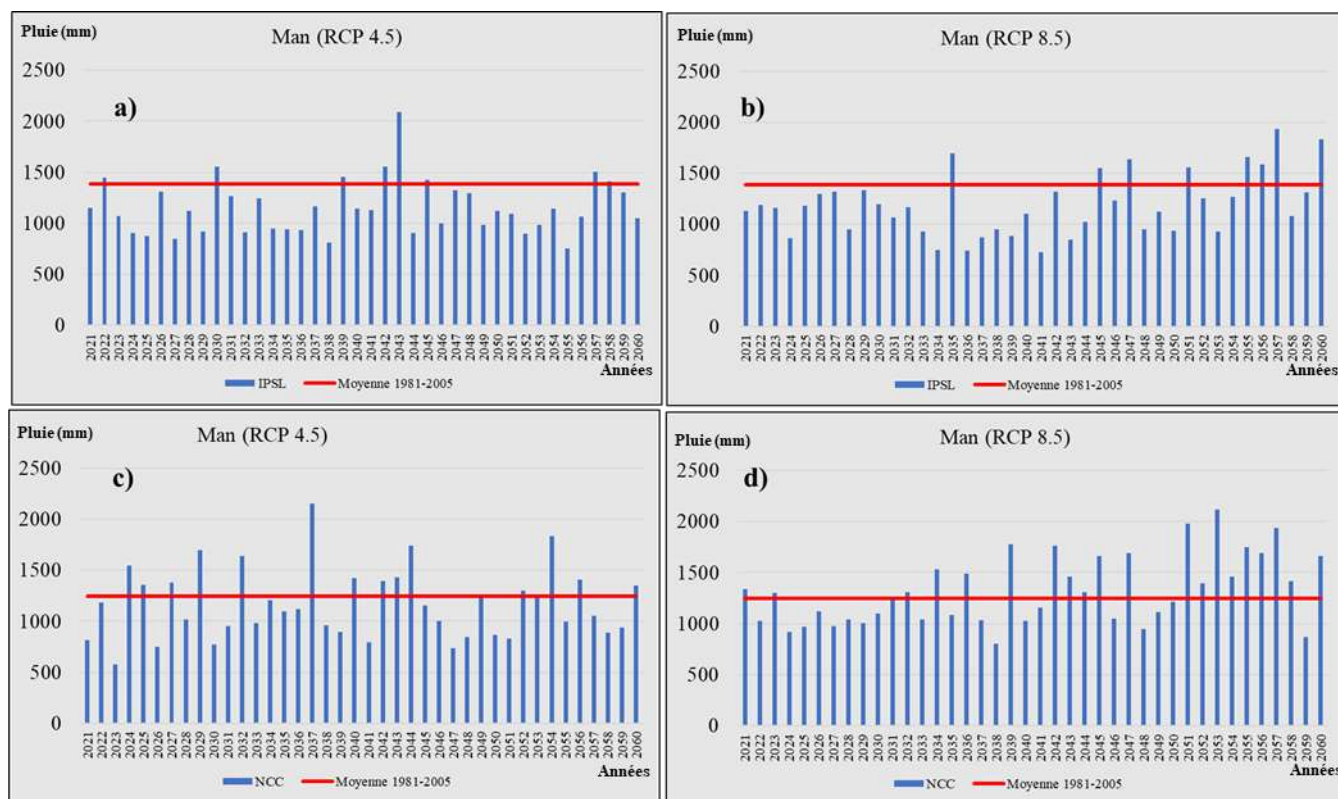


Figure 46 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone de Man de 2021 à 2060

■ Zone de Odiénné

Le modèle ICHEC indique pour le scénario RCP 4.5 une pluviométrie maximale de 2889,7 mm en 2043, une valeur minimale de 881,6 mm en 2055 et une moyenne de 1496,5 mm (Figure 47a). Pour le scénario RCP 8.5, la pluie atteint 2311,1 mm au maximum en 2035, 994,8 mm au minimum en 2037 et une moyenne de 1505,5 mm (Figure 47b).

Selon le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une pluie maximale de 1989,6 mm en 2037, une valeur minimale de 453,5 mm observée en 2023 et une moyenne de 1167,6 mm (Figure 47c). Pour le scénario RCP 8.5, les hauteurs maximales atteignent 2083,1 mm en 2042, les minimales 729,3 mm en 2033 et la moyenne 1283,5 mm (Figure 47d).

Comparativement à la moyenne de la période de référence, qui s'établit à 1037,8 mm pour IPSL et 1042,7 mm pour NCC, la zone d'Odiénné enregistrera des pluies supérieures à ces valeurs selon les deux scénarios et les deux modèles.

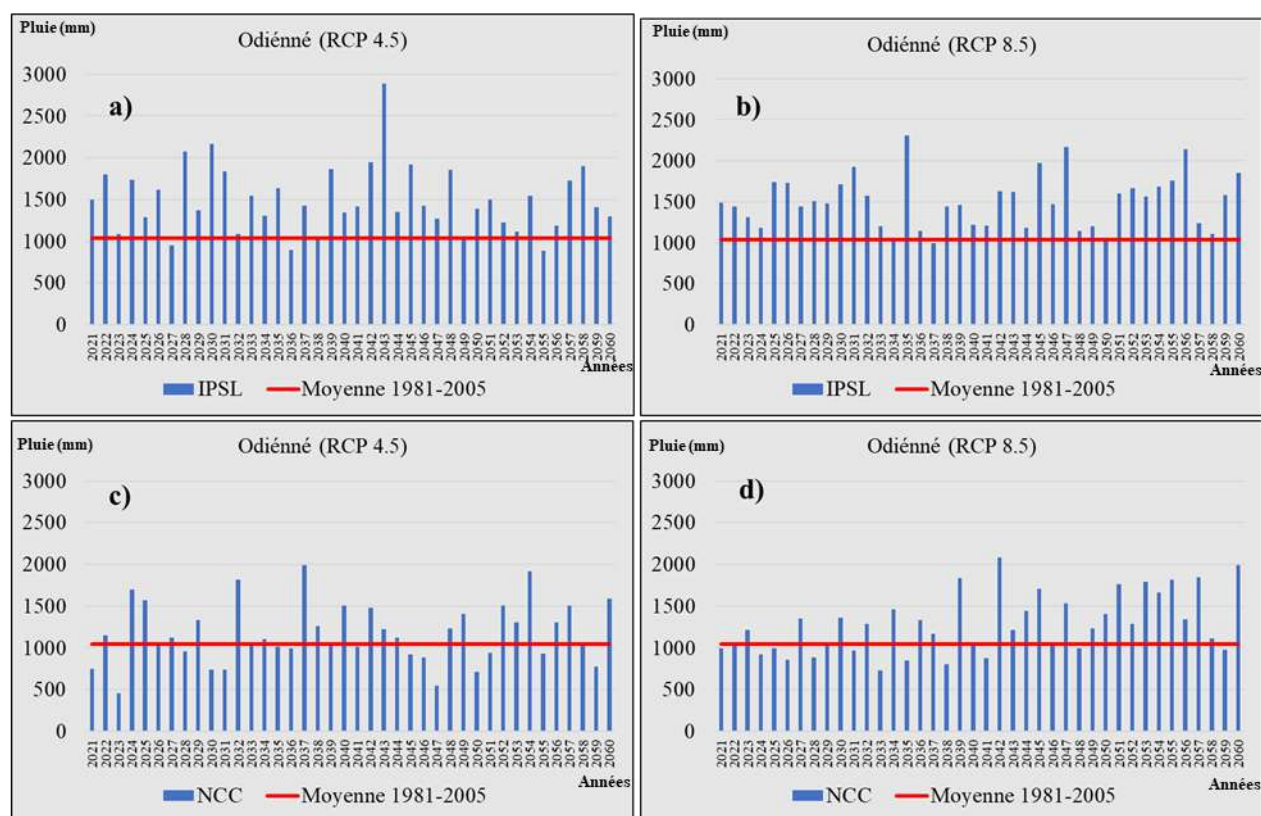


Figure 47 : Hauteurs de pluies attendues dans la zone d'Odienné de 2021 à 2060

❖ Températures moyennes attendues sur la période 2021-2060

Les figures 48, 49 et 50 présentent l'évolution des températures moyennes interannuelles simulées par les modèles climatiques régionaux en comparaison avec la moyenne de la période de référence (1981-2005) respectivement dans les zones de Daloa, Man et Odienné.

L'analyse des figures montre que les températures seront toutes à la hausse.

▪ Zone de Daloa

Le modèle ICHEC indique pour le scénario RCP 4.5 une température moyenne maximale de 29,4°C en 2057, une température moyenne minimale de 27,2°C en 2032 et une moyenne de 28,1°C (Figure 48a). Pour le scénario RCP 8.5, la température atteint 29,7°C au maximum en 2056, 27,4°C au minimum en 2024 et une moyenne de 28,5°C (Figure 48b).

Selon le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une température maximale de 28,8°C en 2045, une minimale de 27,1°C en 2022 et une moyenne de 28°C (Figure 48c). Pour le scénario RCP 8.5, la température maximale atteint 28,9°C en 2060, la minimale 26,4°C en 2025 et la moyenne 27,7°C (Figure 48d). En comparaison avec la moyenne de la période de référence qui est de 24,7°C et 25°C respectivement pour le modèle ICHEC et NCC, la zone de Daloa enregistrera

des températures moyennes supérieures à la période de référence et ce, selon les deux scénarii et les deux modèles.

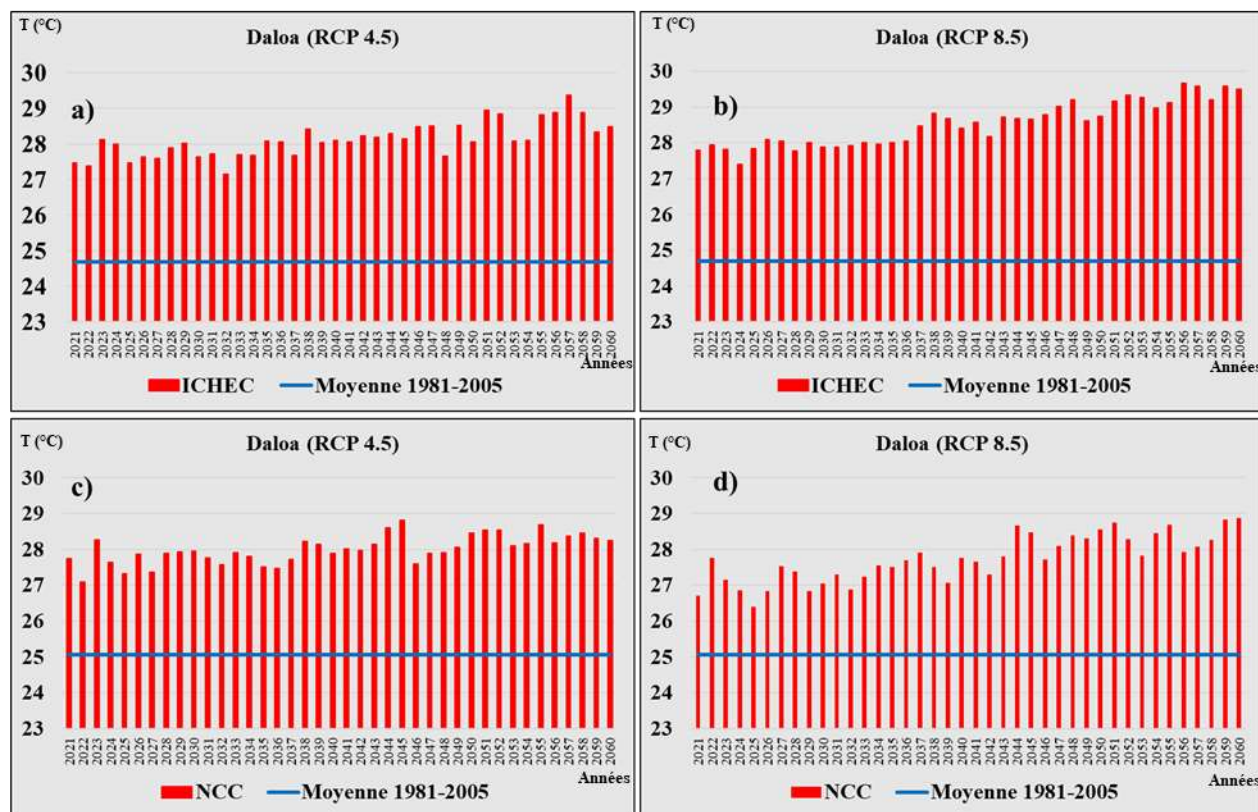


Figure 48 : Températures moyennes attendues dans la zone de Daloa de 2021 à 2060

▪ Zone de Man

Le modèle IPSL indique pour le scénario RCP 4.5 une température moyenne maximale de 28,6°C en 2060, une minimale de 26°C en 2021 et une moyenne de 26°C (Figure 49a). Pour le scénario RCP 8.5, la température atteint 30°C au maximum en 2060, 26°C au minimum en 2021 et une moyenne de 28°C (Figure 49b).

Selon le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une température maximale de 27,8°C en 2045, une minimale de 25,7°C en 2022 et une moyenne de 26,7°C (Figure 49c). Pour le scénario RCP 8.5, la température maximale atteint 28,6°C en 2060, la minimale 26,3°C en 2025 et la moyenne 27,5°C (Figure 49d).

Comparée à la moyenne de la période de référence, qui s'élève à 25,4°C pour IPSL et 23,3°C pour NCC, la zone de Man connaîtra des températures supérieures à cette période selon les deux scénarios et les deux modèles.

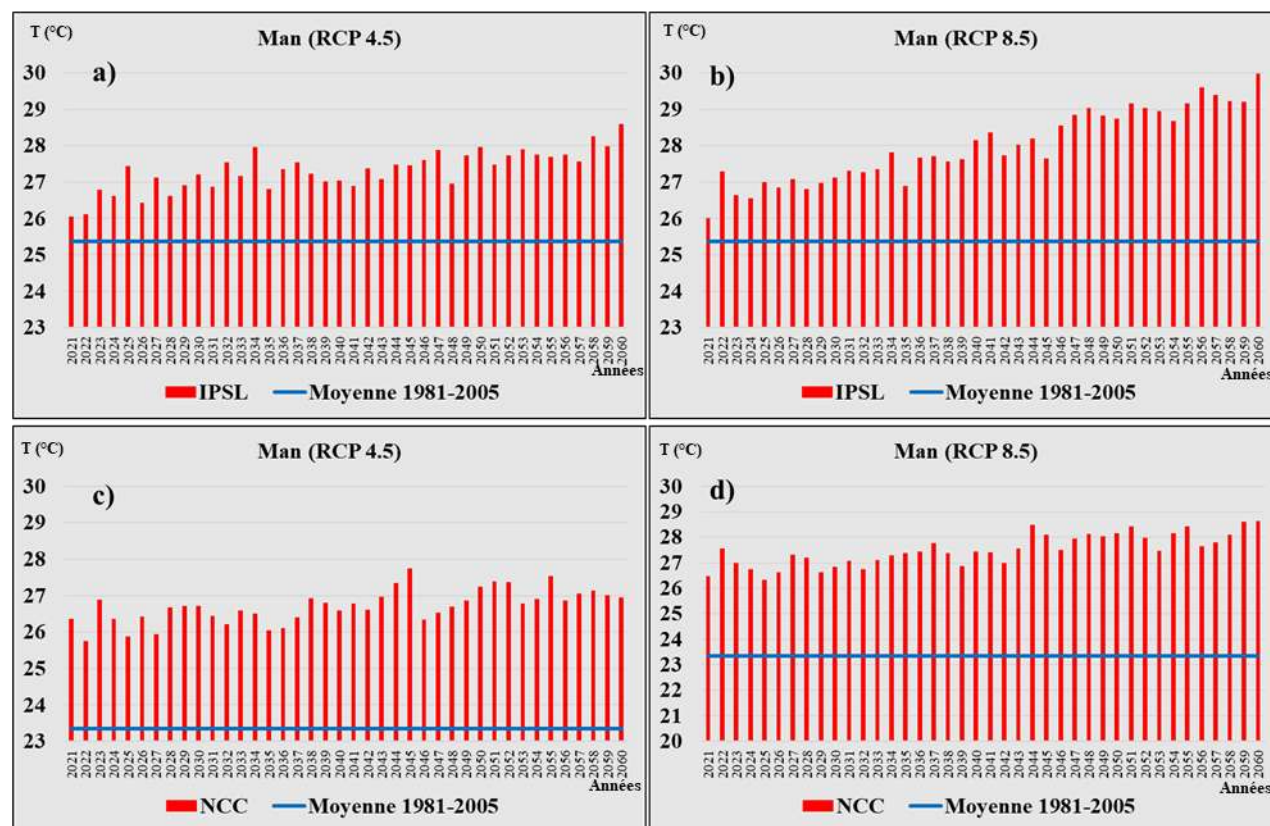


Figure 49 : Températures moyennes attendues dans la zone de Man de 2021 à 2060

▪ Zone de Odienné

Le modèle IPSL indique pour le scénario RCP 4.5, une température moyenne maximale de 29,9°C en 2060, une minimale de 27,3°C en 2021 et une moyenne de 28,6°C (Figure 50a). Pour le scénario RCP 8.5, la température atteint 31,3°C au maximum en 2035, 27,2°C au minimum en 2021 et une moyenne de 29,4°C (Figure 50b). Selon le modèle NCC, le scénario RCP 4.5 enregistre une température maximale de 29°C en 2045, une minimale de 27°C en 2022 et une moyenne de 28°C (Figure 50c). Pour le scénario RCP 8.5, la température maximale atteint 29,6°C en 2060, la minimale 27,1°C en 2025 et la moyenne 28,4°C (Figure 50d). Comparée à la moyenne de la période de référence, qui s'élève à 26,4°C pour IPSL et 23,9°C pour NCC, la zone d'Odienné connaîtra des températures supérieures à cette période selon les deux scénarios et les deux modèles.

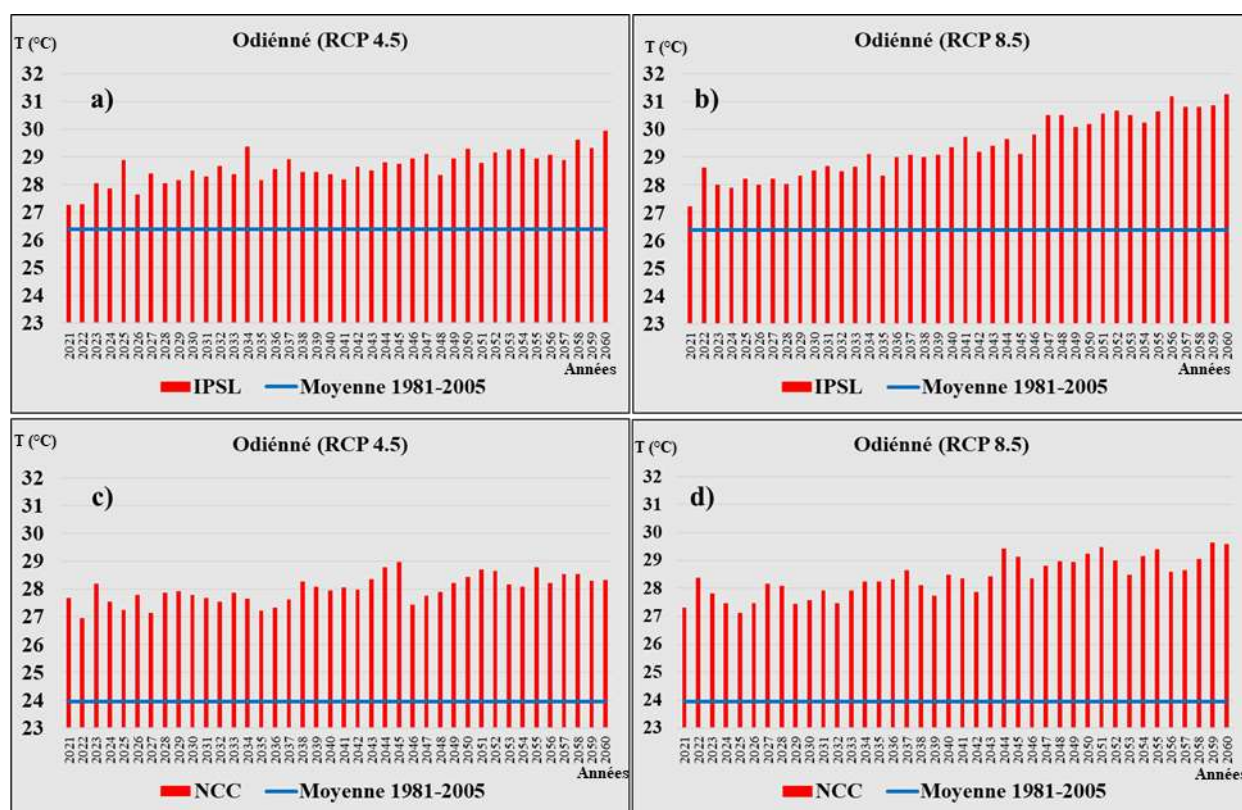


Figure 50 : Températures moyennes attendues dans la zone d'Odienné de 2021 à 2060

6.3. Évaluation des impacts hydrologiques des changements climatiques

Les résultats de l'étude des impacts des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin sont présentés dans les sections ci-dessous.

6.3.1. Détermination de la pluie et de l'ETP moyennes

Les données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle moyennes sont utilisées à l'entrée du modèle GR4J. Ces données proviennent de la moyenne multi modèle des modèles NCC, ICHEC et IPSL. La méthode des polygones de Thiessen est utilisée pour le calcul des précipitations et des évapotranspirations potentielles moyennes journalières.

6.3.2. Simulation des écoulements

- **Performances du modèle GR4J**

Les résultats du calage et de la validation obtenus sont présentés dans le tableau XXII. Au calage, le critère de Nash obtenu est de 85,9%. À la validation, sa valeur est de 70,6 %. Les valeurs des paramètres X_2 (le coefficient d'échange souterrain) et X_1 (la capacité maximale du réservoir 'Sol')

respectent bien l'intervalle de confiance défini par le CEMAGREF. Le critère de Nash au calage et à la validation est très satisfaisant.

Tableau XXII : Valeurs des paramètres au calage et à la validation du modèle GR4J

Bassin	Paramètres				Calage		Validation	
Sassandra à Buyo (39 890 km ²)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Période	Nash (%)	Période	Nash (%)
	2,57	-4,58	6,42	1,94	1985-1989	85,1	1977-1982	83,4

• Hydrogrammes au calage et à la validation du modèle GR4J

Les débits calculés et observés au calage et à la validation pour les différentes périodes, permettent d'apprécier visuellement la performance du modèle (Figure 51). De façon générale, il ressort des observations que les hydrogrammes calés et validés présentent un meilleur synchronisme. En effet, la dynamique des écoulements est bien respectée et les crues sont reproduites au calage (Figure 51a) et à la validation (Figure 51b). Les résultats au calage montrent un meilleur synchronisme entre les hydrogrammes simulés et observés. A la validation, le modèle a presque le même comportement qu'au calage. On note une légère dégradation du synchronisme entre les hydrogrammes simulés et observés en calage tout comme à la validation. Cependant, il y a une bonne répartition saisonnière des débits sur les périodes au calage et à la validation.

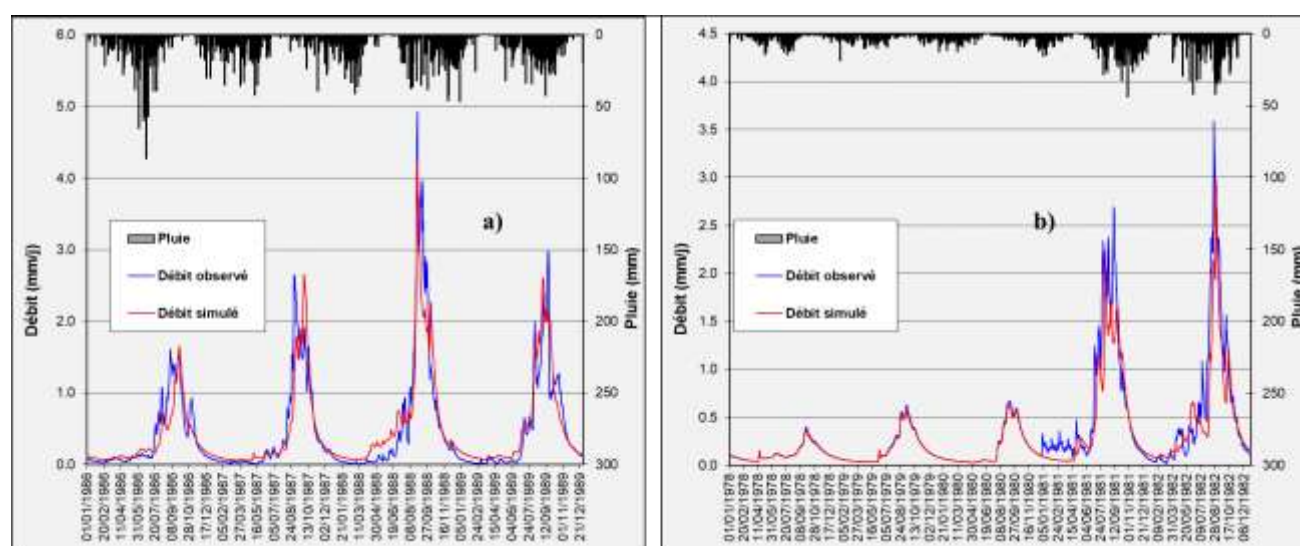


Figure 51 : Hydrogrammes des débits observés et simulés au calage (a) et à la validation (b)

6.3.3. Impacts des changements climatiques sur les écoulements

Les résultats sont présentés en fonction des horizons choisis, des scénarii retenus et à différents pas de temps (mensuel et annuel).

6.3.3.1. Débits moyens mensuels

L'examen des débits moyens mensuels aux horizons 2030 et 2050 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, montre leur variation dans le temps (Figure 52). On note à cet effet une assez bonne concordance entre les régimes hydrologiques simulés aux différents horizons selon les deux scénarios et ceux de la période d'observation (1981-2010). En effet, le mois de septembre demeure le mois où les pics de crues sont observés jusqu'à l'horizon 2050, à l'exception du scénario RCP 8.5 où l'on constate un déplacement du pic au mois d'Août (Figure 52b). En termes de dynamisme des écoulements, on note des modifications significatives du régime hydrologique : les périodes des basses eaux et des hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période 1981-2010. Toutefois, les modifications portent essentiellement sur les volumes d'eau écoulée. Ces modifications sont valables à tous les horizons et selon les deux scénarios. L'exception est faite pour le scénario RCP 4.5 à l'horizon 2050, où le volume d'eau enregistrée mensuellement est inférieur à celui du mois d'août en comparaison aux débits observés.

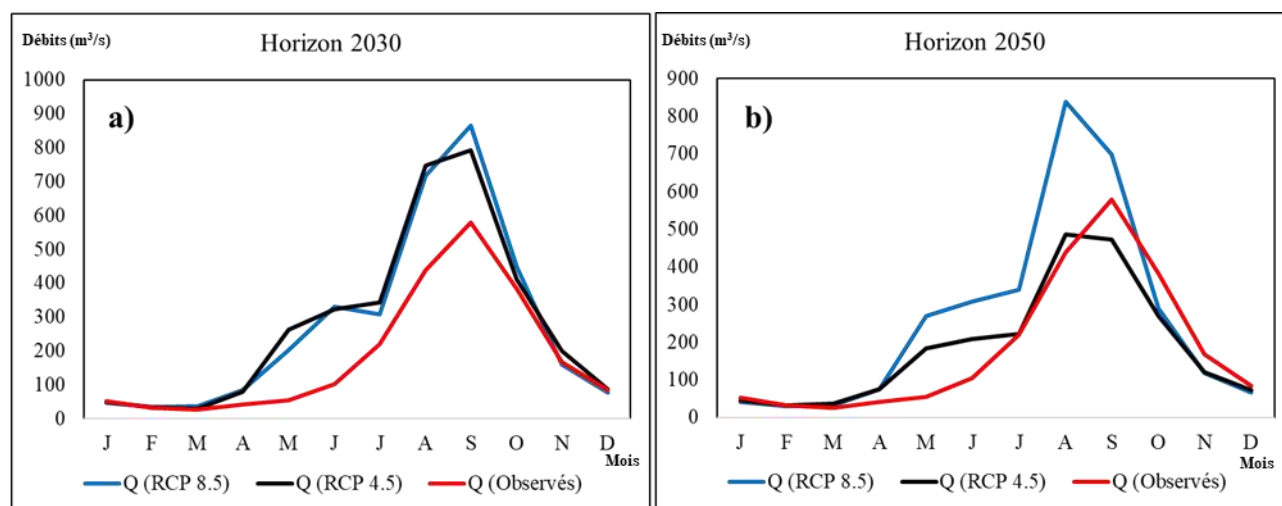


Figure 52 : Hydrogrammes moyens des débits simulés et observés aux horizons 2030 et 2050

6.3.3.2. Débits moyens annuels

Les taux de variations des débits moyens annuels montrent qu'il pourrait exister des hausses d'écoulements importants par rapport à ceux de la période 1981-2010 (Figure 53). Les écoulements moyens annuels attendus sur l'ensemble du bassin versant pourraient augmenter à l'horizon 2030

(Tableau XXIII) de 55% selon le scénario RCP4.5, soit une lame d'eau de 0,22 mm/j (99,3 m³/s) et de 53% selon le scénario RCP8.5, soit une lame d'eau de 0,21 mm/j (95,4 m³/s). Rappelons que le débit moyen observé sur la période 1981-2010 est de 181,3 m³/s soit une lame d'eau de 0,39 mm/j. A l'horizon 2050, le scénario RCP4.5 prévoit une augmentation des débits moyens annuels de 2%, soit une lame d'eau de 0,01 mm/j (4,2 m³/s). Quant au scénario RCP8.5, il prévoit une augmentation de 43%, soit une lame d'eau de 0,17 mm/j (77,6 m³/s). Le tableau XXIII récapitule les caractéristiques de la réponse hydrologique du bassin versant. Toutefois, les écoulements pourraient baisser à l'horizon 2050 comparativement à ceux de l'horizon 2030 suivant les deux scénarii. Cette baisse est estimée à 95,1 m³/s soit, 33% selon le scénario RCP4.5 et à 17,8 m³/s soit, 7% selon le scénario RCP8.5.

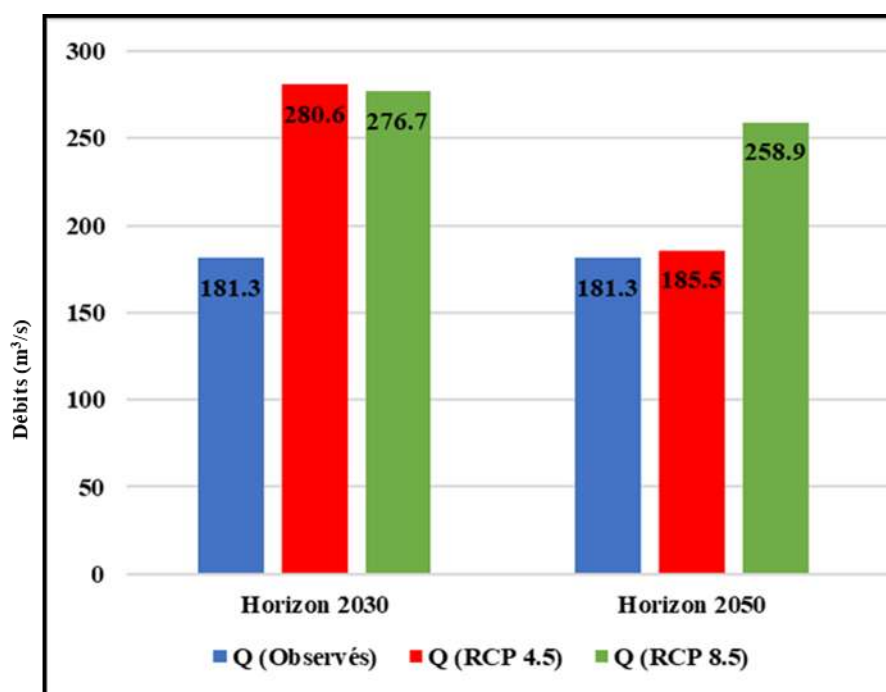


Figure 53 : Débits moyens annuels simulés aux horizons 2030 et 2050 et observés (1981-2010)

Tableau XXIII : Récapitulatif des caractéristiques de la réponse hydrologique du bassin versant

Horizons	Observés	Q (m ³ /s)		Le (mm/j)		Excédent	
		181,3	0,39	Écart	Q (m ³ /s)	Le (mm/j)	
2030	RCP 4.5	280,6	0,61	55%	99,3	0,22	
	RCP 8.5	276,7	0,60	53%	95,4	0,21	
2050	RCP 4.5	185,5	0,40	2%	4,2	0,01	
	RCP 8.5	258,9	0,56	43%	77,6	0,17	

6.3.3.3. Débits moyens interannuels

La figure 54 présente la variation interannuelle des débits simulés par le modèle GR4J sur la base des scénarii RCP4.5 et RCP8.5. Les débits sont comparés à ceux observés sur la période de référence (1981-2010).

Le scénario RCP4.5 prévoit un débit moyen maximal de 487 m³/s en 2022, un débit moyen minimal de 80,8 m³/s en 2050 et une moyenne de 233,1 m³/s. Quant au scénario RCP8.5, il prévoit un débit moyen maximal de 472,7 m³/s en 2023, un débit moyen minimal de 72,5 m³/s en 2033 et une moyenne de 472,7 m³/s.

L'analyse de la figure 55 indique qu'en 2030, les débits simulés seront supérieurs à ceux de la période de référence. En revanche, au-delà de 2030, les débits connaîtront de fortes fluctuations se traduisant par des hausses et des baisses sans tendances véritables. Ces observations sont valables pour les deux scénarii.

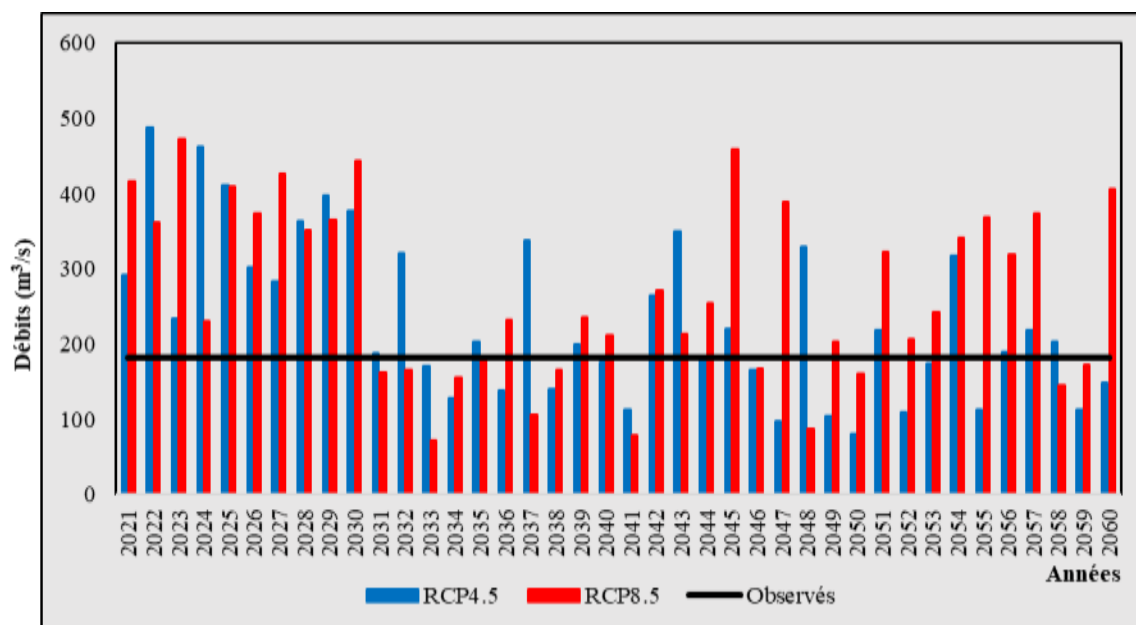


Figure 54 : Évolution interannuelle des débits entrants dans la retenue du barrage de Buyo aux horizons futurs

Discussion

La procédure de correction des biais a montré un niveau d'incertitudes, comme le montrent les écarts observés aux différentes stations synoptiques. De telles incertitudes ont déjà été observées dans d'autres études comme celles de Zhang *et al.* (2018) dans le cas de la méthode de correction du biais de distribution et de l'échelle d'intensité locale. Dans d'autres cas, la méthode de correction du biais de transformation de puissance a amélioré les statistiques de variabilité alors qu'elle s'est avérée mal ajustée par la probabilité. En même temps, la méthode de correction du biais de mise à l'échelle linéaire a pu éliminer efficacement le biais dans les précipitations moyennes (Zhang *et al.*, 2018). Par conséquent, toutes les autres méthodes de correction du biais telles que la méthode de mise à l'échelle locale de l'intensité des prélèvements, la méthode de transformation de puissance des prélèvements et la méthode de correspondance de distribution (cartographie des quantiles) ont montré leurs avantages respectifs. Elles ont également montré des incertitudes dans la correction du biais des séries chronologiques de précipitations et de températures. Néanmoins, les résultats de cette étude ont montré la nécessité d'appliquer une correction de biais aux ensembles de données brutes des MCR avant de les déployer pour toute évaluation de l'impact du changement climatique. Pour l'application d'une correction de biais pour des études dans le domaine de l'hydrologie, Willkofer *et al.* (2018) ont montré que la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) surpasse la méthode de mise à l'échelle locale de l'intensité des prélèvements et la méthode de mise à l'échelle linéaire (multiplicatif and additif) et est donc la plus appropriée pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant. Également, pour quantifier les impacts du changement climatique sur la dynamique des débits, Zhang *et al.* (2018) ont montré que la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) et la méthode de la variance à l'échelle de la température fonctionnaient légèrement mieux dans les statistiques basées sur la fréquence pour la température par rapport à la méthode de mise à l'échelle linéaire. Ils ont noté, cependant, que la méthode de la variance à l'échelle des températures fonctionnait mieux que la méthode de répartition spatiale pour les statistiques basées sur des séries chronologiques pour la température.

Les résultats de la simulation du climat futur ont fait remarquer que tous les modèles de façon unanime, prédisent pour la zone, une hausse de la température moyenne aux horizons 2030 et 2050 quel que soit le scénario. De ce fait, il est prévu pour les modèles climatiques, une hausse de la température moyenne de +1,6 à +4,4 °C pour le scénario d'adaptation RCP 4.5 et +2,1 à +5°C

pour le scénario le plus pessimiste (scénario sans adaptation) RCP 8.5. À l'horizon 2050, le contraste thermique sera plus accentué. D'un point de vue général, le bassin versant connaîtra des perturbations dans le futur qui se traduiront par de fortes variations des précipitations et par la hausse des températures. Des études récentes menées sur les projections climatiques ont montré que l'Afrique de l'Ouest va connaître une hausse importante des températures associée à une forte variabilité des précipitations (Kouakou, 2011; Alhassane *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2014 ; Yéo, 2017 ; Coulibaly *et al.*, 2018). Ces changements climatiques pourraient entraîner des conséquences néfastes sur l'environnement telles que les inondations ou la sécheresse (Rifai *et al.*, 2014 ; Sylla *et al.*, 2016). Se référant aux variations moyennes de températures prévues par les différents modèles, il est constaté que la zone d'étude enregistrera aux horizons 2030 et 2050, d'importants changements thermiques qui dépasseront ceux qu'elle a connu par le passé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui projette une augmentation de la température globale entre 1,4°C et 5,8°C d'ici la fin du siècle si la concentration du CO₂ double dans l'atmosphère, avec des conséquences sur l'environnement (GIEC, 2007 ; GIEC 2023).

Les résultats présentés par le modèle GR4J ont donné un critère de Nash-Sutcliffe (NS) satisfaisant en calage correspondant à 85,1%. A la validation, le modèle a mieux reproduit le débit simulé avec une valeur de NS de 83,4%, valeur assez satisfaisante. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Yao *et al.* (2012) sur le bassin versant de la rivière Lobo, un affluent du fleuve Sassandra. Par ailleurs, plusieurs auteurs (Perrin, 2000 ; Sighomnou, 2004 ; Badin, 2004 ; Kouakou *et al.*, 2005 ; Mangoua, 2013 ; Kamagaté *et al.*, 2017) ont montré une dégradation des valeurs de NS en passant du calage à la validation. La dégradation des valeurs de NS à la validation pourrait être attribuée à la longueur de la période de validation. Aussi, les hydrogrammes des débits simulés et observés ont montré de bons synchronismes, à l'exception pointes de crues qui enregistrent des écarts. Ces décalages entre les hydrogrammes simulés et observés pourraient s'expliquer en grande partie par les contrastes climatiques et aussi par la non prise en compte des états de surface du bassin versant. En effet, la dégradation du couvert végétal contribue à accroître les écoulements de surface tels que mis en évidence par les travaux de Kouadio (2011). Des nombreux travaux (Goula, 1993 ; Servat & Sakho, 1995 ; Brou *et al.*, 1998) relatifs à l'aptitude des bassins versants à drainer les lames d'eau, ont montré que les principaux facteurs sont la nature géologique du substratum, la dynamique du couvert végétal, la pente et les indices de compacité.

Ces caractéristiques n'ont pas été toutes prises en compte dans le modèle. En effet, Abdelkader *et al.*, (2019) ont montré que les données de débits n'interviennent pas dans l'étape de la validation comme paramètres d'ajustement du modèle GR4J. ces travaux portent sur la comparaison des performances du modèle hydrologique semi-distribué à base physique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et du modèle global à réservoirs GR4J (Génie rural à quatre paramètres journaliers).

Selon les projections futures, les écoulements moyens annuels sur le bassin versant, pourraient augmenter à court et moyen termes. Ainsi, selon le scénario RCP4.5, cette augmentation pourrait atteindre 55 %, selon le scénario RCP 4.5 soit, une lame d'eau de 0,22 mm/j et 53 % selon le scénario RCP 8.5, soit une lame d'eau de 0,21 mm/j, à l'horizon 2030. À long terme, on note une augmentation relativement faible de 2 % soit, une lame d'eau de 0,01 mm/j, selon le scénario RCP4.5 et 43 % soit, une lame d'eau de 0,17 mm/j selon le RCP 8.5. Ces résultats sont en phases avec ceux des travaux de Badin *et al.*(2005), IPCC (2008), Koua *et al.*(2014) et Koua *et al.*(2019) qui ont montré que les écoulements pourraient varier dans le futur suivant celles des précipitations. Une situation qui pourrait entraîner des fluctuations des écoulements sur le bassin versant du fleuve Sassandra. En revanche, les écoulements sont à la baisse à l'horizon 2050 par rapport à ceux de l'horizon 2030. Des résultats similaires ont été obtenus par Koua *et al.* (2019) dans les travaux de sur le même bassin versant du fleuve Sassandra. Cependant, cette augmentation des écoulements à l'horizon 2050 pourrait s'expliquer par le fait que la normale de référence (1981-2010) apparaît juste après les ruptures climatiques des années 70. Ces ruptures ont eu pour conséquence, la modification profonde des régimes hydrologiques et pluviométriques des grands bassins de l'Afrique de l'ouest. A la différence des travaux de Koua *et al.* (2019) où la période de référence choisie (1950-1979) est assez tardive, au cours de laquelle il pleuvait suffisamment.

Conclusion partielle

Cette partie de l'étude a permis de choisir et valider des modèles climatiques régionaux depuis la base de données CORDEX-Afrique afin de décrire le climat futur du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo (Ouest de la Côte d'Ivoire). L'étude révèle que les modèles ICHEC, IPSL et NCC ont une bonne aptitude à simuler le climat du bassin. La simulation du climat montre des variations des paramètres climatiques. Le scénario RCP4.5, prévoit des fluctuations de la pluviométrie de -20,8% à +58,1% à l'horizon 2030 et de -18,8% à +61,7% à l'horizon 2050. Le RCP 8.5 prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4% à +43,8% à l'horizon 2030 et de -

7,5% à +73,3% à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1,6 à +4,4°C pour le RCP4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP8.5.

La simulation des écoulements a permis de noter une conservation du régime hydrologique. Néanmoins, les modifications s'observent plus sur le volume d'eau écoulée. On note à cet effet, une baisse du volume des écoulements à l'horizon 2050, selon le RCP4.5. Au niveau des écoulements annuels, on note une hausse par rapport à la période 1981-2010. Aux horizons futurs, il est prévu des augmentations des écoulements à l'horizon 2030 de 55 % selon le scénario RCP4.5, soit une lame d'eau de 0,22 mm/j (99,3 m³/s) et de 53 % selon le scénario RCP 8.5, soit une lame d'eau de 0,21 mm/j (95,4 m³/s). A l'horizon 2050, le scénario RCP4.5 prévoit une augmentation des débits moyens annuels de 2 %, soit une lame d'eau de 0,01 mm/j (4,2 m³/s), le scénario RCP 8.5 quant à lui prévoit une augmentation de 43 %, soit une lame d'eau de 0,17 mm/j (77,6 m³/s). Cependant, par rapport à l'horizon 2030, les écoulements sont en baisse de 95,1 m³/s soit 33% selon le RCP 4.5 et de 17,8 m³/s soit 7% selon le RCP 8.5.

Chapitre 7 : Impacts changements climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique du barrage de Buyo

Introduction partielle

Cette partie du travail présente les résultats relatifs à l'influence du climat sur la production hydroélectrique du barrage de Buyo, en tenant compte des variations pluviométriques et thermiques ainsi que de l'évolution de la lame d'eau. Elle met en évidence les effets des conditions climatiques actuelles sur les écoulements et la production d'électricité, tout en intégrant les projections futures afin d'évaluer l'impact potentiel des changements de pluviométrie et de température sur la disponibilité en eau et le rendement du barrage. Les résultats obtenus constituent la base de la discussion sur les implications de la variabilité et du changement climatique pour la gestion et l'optimisation de la production hydroélectrique.

7.1. Variation pluviométrique associées aux phénomènes climatiques

Sur la période de 42 ans (1981-2022), 24 années associées à El Niño ont été identifiées. Cela représente environ 57% de la période, soit environ 2 années sur 3.

Les années identifiées avec des $SPI \leq -0,5$ montrent des périodes où les trois stations ont subi des sécheresses modérées à extrêmes. Ainsi, la station de Daloa a connu le plus grand nombre d'années de sécheresse marquée, suivi d'Odienné et de Man. L'analyse du tableau XXVI montre un déficit pluviométrique moyen de 12% à Daloa, où 10/42 années soit 23,8% du temps, les sécheresses sévères à extrêmes ont été observées. À Odienné, le déficit pluviométrique moyen est de 4% (08/42) soit 19,5% du temps, les sécheresses sévères à extrêmes ont été observées. À Man, c'est un excédent pluviométrique moyen de 5% qui a été observé bien que des périodes de sécheresse modérée à extrême sur 11% du temps ont été enregistrées notamment de 2004 à 2012. Les années El Niño ont souvent coïncidé avec des périodes de sécheresse, particulièrement sévères à Odienné et Man. Les sécheresses sont les plus marquées en 1983, 1986-1987, 1991-1992, 2002-2003, 2004-2005, et 2006-2007. Il est à noter qu'au niveau climatique, le phénomène El Niño a été observé de 2002 à 2010 à l'exception de l'année 2008. En général, les années El Niño coïncident avec les années de déficit pluviométrique sur les trois stations. Cependant, pour certaines années El Niño, des conditions humides ont été observées, notamment sur les périodes 2009-2010 et 2018-2019.

Le tableau XXIV présente les valeurs de l'indice des précipitations standardisé, les intensités de sécheresse et les phénomènes climatiques associés.

Tableau XXIV : Indice de précipitation standardisé (SPI) et intensité de la sécheresse associée aux phénomènes climatiques aux stations de Daloa, Odienné et Man (1981-2022)

Stations						Phénomènes observés
Daloa		Odienné		Man		
SPI						
Années		Intensité		Intensité		Intensité
1981	-1,2	SS	0,5		1,0	
1982	-0,2		1,1	SS	0,9	EL-Nino
1983	-1,2	SS	-1,1	SS	-0,8	EL-Nino
1984	-0,8	SM	-0,3		0,4	
1985	0,4		-0,9	SM	0,7	
1986	-0,3		-1,2	SS	-0,5	SM EL-Nino
1987	1,9		-1,3	SS	0,1	EL-Nino
1988	-0,4		-0,3		0,5	EL-Nino
1989	0,0		0,1		0,1	
1990	-1,2	SS	-0,6	SM	-0,3	
1991	-1,5	SS	-0,1		0,2	EL-Nino
1992	-1,1	SS	-1,1	SS	0,2	EL-Nino
1993	-1,1	SS	-0,5	SM	-0,7	SM
1994	-0,5		0,7		1,3	EL-Nino
1995	0,6		0,8		1,6	EL-Nino
1996	0,0		0,0		1,0	
1997	-0,7	SM	0,2		0,1	EL-Nino
1998	-0,6	SM	1,1		0,9	EL-Nino
1999	1,0		-0,2		1,8	
2000	0,6		0,3		0,3	
2001	-1,9	SS	0,0		0,4	
2002	-0,1		-0,6	SM	0,7	EL-Nino
2003	1,0		-1,2	SS	-0,8	EL-Nino
2004	0,1		-1,6	SE	-2,0	SE EL-Nino
2005	-0,5	SM	-0,9	SM	-1,4	SE EL-Nino
2006	-0,1		-1,6	SE	-1,8	SE EL-Nino
2007	-0,4		-1,6	SE	-1,8	SE EL-Nino
2008	1,2		0,1		-0,5	SM
2009	0,2		0,3		-0,9	SM EL-Nino
2010	1,1		1,5		0,8	EL-Nino
2011	-1,1	SS	-0,6	SM	-1,1	SS
2012	1,3		0,2		-0,7	SM
2013	1,9		0,6		0,2	
2014	1,6		-0,5	SM	0,4	EL-Nino
2015	-0,7	SM	-0,1		-0,2	EL-Nino
2016	0,0		1,4		1,0	EL-Nino
2017	-2,0	SE	-1,2	SS	0,7	
2018	0,6		1,4		0,5	EL-Nino
2019	0,8		2,0		-0,3	EL-Nino
2020	0,1		1,3		0,2	
2021	-0,6		1,3		0,1	
2022	-1,1	SS	1,0		-0,2	

7.2. Variation thermique

Au niveau de la thermométrie, les observations montrent que le bassin versant s'est réchauffé en moyenne de 0,3°C depuis la décennie 1990. ainsi, sur les dix dernières années (2001-2010), l'année 2010 a été la plus chaude avec un écart de +1,2°C, comparée à la moyenne de la période 1961-1990 devant l'année 2008 et 2005 dont l'écart est de 0,9°C.

Les valeurs des écarts de température (tableau XXV) par rapport aux normales 1961-1990 et 1991-2020 sont significatives. Elles peuvent ainsi affecter l'évaporation des plans d'eau du barrage de Buyo. Ce qui conduirait à la réduction de la potentialité de production de l'énergie hydroélectrique. Des températures élevées peuvent également augmenter l'évaporation et réduire les débits fluviaux. Les données du tableau XXV montrent que depuis les années 1990, les écarts de températures sont maintenus au-dessus de 0,5°C, indiquant une augmentation significative des températures par rapport aux différentes normales.

Le réchauffement moyen au niveau du bassin versant de 1981 à 2022, indique une hausse de température de 0,2°C, 0,6°C, 0,7°C respectivement à Daloa, Odienné et Man. Pour les périodes 1991-2022 et 2001-2022, ces hausses passent de température de 0,2°C à 0,4°C à Daloa, de 0,6°C à 0,8°C à Odienné, de 0,7°C à 1°C à Man, soit une hausse de température de 0,1°C par décennie.

Tableau XXV : Ecart de températures aux stations de Daloa, Odienné et Man comparés aux normales 1961-1990 et 1991-2020

Années	Écart 1961-1990			Écart 1991-2020		
	Stations			Stations		
	Daloa	Odienné	Man	Daloa	Odienné	Man
1981	-0,2	0,1	0,2	-0,6	-0,6	-0,6
1982	-0,4	-0,2	-0,1	-0,8	-0,9	-0,9
1983	0,5	0,5	0,4	0,1	-0,3	-0,4
1984	0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,7
1985	-0,2	0,4	-0,2	-0,6	-0,4	-1,0
1986	-0,4	0,0	-0,1	-0,8	-0,8	-0,9
1987	0,2	1,0	0,9	-0,2	0,3	0,1
1988	-0,1	0,5	0,2	-0,4	-0,2	-0,6
1989	-0,3	0,1	0,2	-0,6	-0,6	-0,7
1990	0,0	0,5	0,5	-0,4	-0,2	-0,4
1991	-0,2	0,5	0,3	-0,6	-0,3	-0,5
1992	-0,2	0,1	0,4	-0,6	-0,6	-0,4
1993	-0,3	0,3	0,5	-0,7	-0,5	-0,3
1994	0,5	0,2	0,3	0,1	-0,5	-0,6
1995	0,4	0,4	0,4	0,1	-0,3	-0,5
1996	-0,1	0,6	0,6	-0,4	-0,1	-0,3
1997	0,1	0,5	0,6	-0,2	-0,2	-0,3
1998	0,6	1,2	1,2	0,2	0,5	0,3
1999	0,0	0,3	0,2	-0,4	-0,4	-0,6
2000	-0,1	0,4	0,3	-0,5	-0,3	-0,5
2001	0,3	0,5	0,5	-0,1	-0,3	-0,3
2002	-0,6	0,7	0,5	-1,0	-0,1	-0,3
2003	0,4	0,6	0,7	0,1	-0,1	-0,1
2004	0,8	0,8	1,0	0,4	0,1	0,2
2005	0,5	1,0	0,7	0,2	0,3	-0,1
2006	0,6	0,8	1,1	0,2	0,1	0,2
2007	0,5	0,9	1,3	0,2	0,1	0,5
2008	0,4	0,6	0,9	0,0	-0,1	0,1
2009	0,4	1,5	1,4	0,0	0,7	0,6
2010	1,1	1,5	1,6	0,7	0,8	0,8
2011	0,3	0,8	1,0	-0,1	0,1	0,2
2012	0,3	0,9	1,1	-0,1	0,1	0,3
2013	0,3	1,2	1,0	0,0	0,5	0,2
2014	0,4	0,6	0,9	0,0	-0,1	0,1
2015	0,7	0,8	0,6	0,3	0,1	-0,2
2016	1,1	1,0	1,3	0,7	0,3	0,5
2017	0,8	0,7	0,8	0,5	0,0	0,0
2018	1,3	0,9	1,3	1,0	0,2	0,5
2019	1,1	1,0	1,2	0,7	0,3	0,4
2020	-0,4	0,5	0,9	-0,8	-0,2	0,1
2021	-0,4	0,9	1,3	-0,7	0,2	0,4
2022	-0,7	0,4	0,9	-1,0	-0,3	0,1

7.3. Analyse de l'évolution temporelle de la lame d'eau

L'examen des figures 55 dévoile plusieurs éléments cruciaux concernant l'indice de la lame d'eau efficace. Sur la période 2005-2022, certaines années se retrouvent dans la zone de "Confort" ou et d'autres dans la zone de "Crise".

Celles qui se retrouvent dans la zone de "Crise" sont 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022 ces années se distinguent par une variabilité plus marquée que d'autres. Les autres années se retrouvent dans les zones "alerte" au "confort" avec une variabilité modérée à faible.

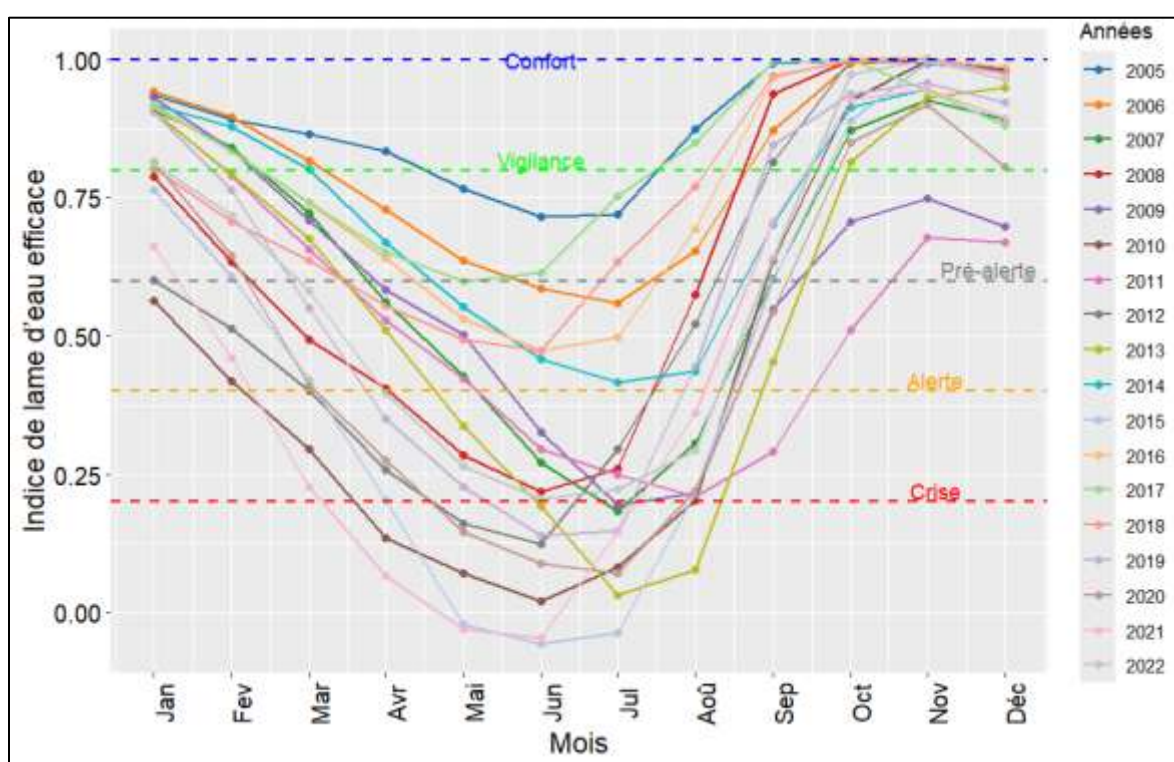


Figure 55 : Évolution interannuelle des indices de lame d'eau efficace sur la période 2005-2022

La figure 56 met en exergue les années de crise ou années de faible niveau de disponibilité d'eau dans la retenue du barrage hydroélectrique de Buyo identifiées à la figure 55. Ainsi, la crise est observée au cours de ces années, de mars à mi-août, période correspondant à la grande saison sèche dans le climat équatorial de transition. Cette période est pour le climat tropical de transition, la grande saison sèche qui fournit peu de précipitations au bassin versant. Pourtant, la grande partie du bassin est couverte par ce régime climatique. Les seuls proviennent du sous bassin versant du

N'Zo, couvert par le climat des montagnes. Ce dernier enregistre des pluies presque toute l'année, en raison de 9 mois sur 12.

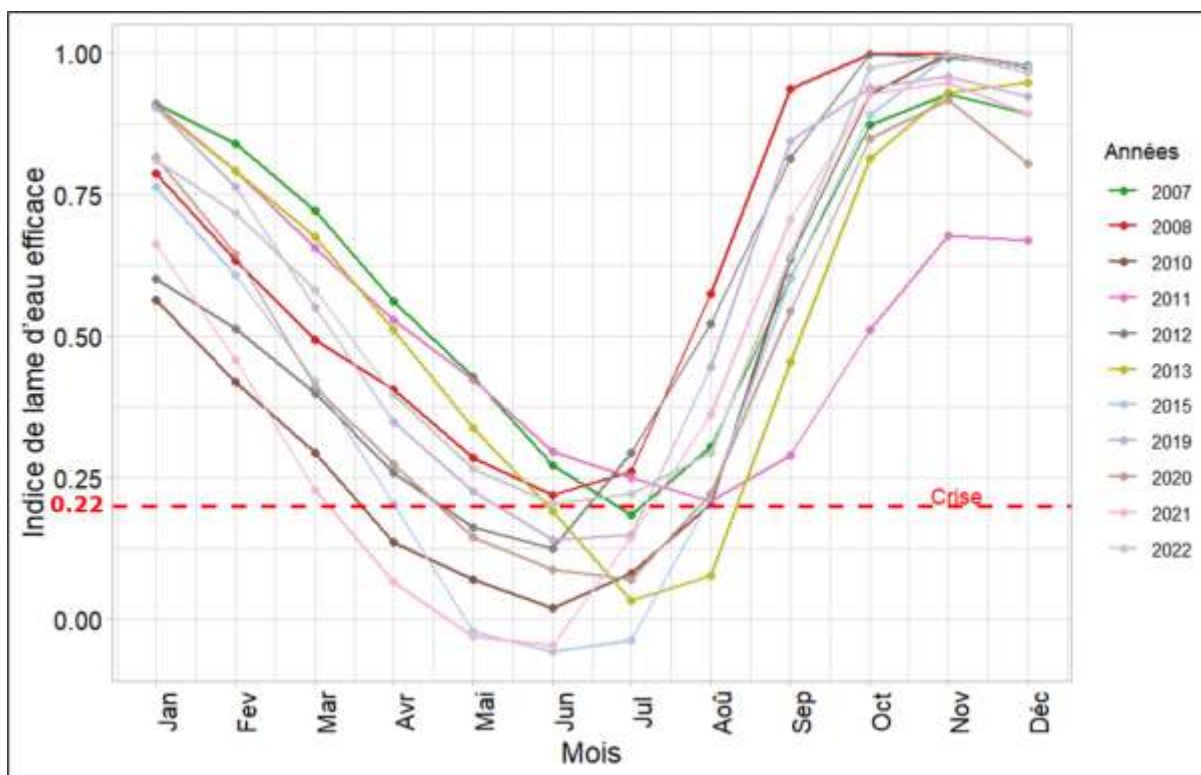


Figure 56 : Évolution interannuelle des indices de lame d'eau efficace des années critiques

7.3.1. Impacts actuels du climat sur la production d'énergie hydroélectrique

Les résultats des impacts du climats sur la production d'énergie permettent de relever plusieurs cas. Ainsi, pour les années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022, où la lame d'eau efficace est tombée en dessous du seuil critique de 0,22 (Tableau XXVI). La situation pluviométrique se présente comme suit :

- les années 2007, 2011, 2015, 2021 et 2022 montrent des périodes de sécheresse modérée à sévère dans certaines stations, ce qui pourrait expliquer les conditions critiques observées ;
- les années 2008, 2010, 2012, 2013, 2019, 2020 et 2021 n'ont pas montré de sécheresse significative selon le SPI, bien que la lame d'eau ait été critique, suggérant que d'autres facteurs locaux pourraient influencer les conditions hydriques ;
- les années spécifiques où la lame d'eau efficace est tombée en dessous du seuil critique de 0,22, combinées à des températures élevées, peuvent exacerber la réduction des débits fluviaux ;

- les années 2010, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022, montrent des écarts de températures variables mais souvent élevées, suggérant des conditions de stress hydrique potentiel pour la production hydroélectrique.

Tableau XXVI : Intensité de sécheresse des années identifiées comme années critiques

Année	Man	Intensité de la sécheresse	Odienné	Intensité de la sécheresse
2007	-1,8	Sécheresse sévère	-1,6	Sécheresse sévère
2008	-0,5	Sécheresse légère	0,1	Pas de sécheresse
2010	0,8	Pas de sécheresse	1,5	Pas de sécheresse
2011	-1,1	Sécheresse sévère	-0,6	Sécheresse légère
2012	-0,7	Sécheresse légère	0,2	Pas de sécheresse
2013	0,2	Pas de sécheresse	0,6	Pas de sécheresse
2015	-0,2	Sécheresse légère	-0,1	Sécheresse légère
2019	-0,3	Sécheresse légère	2	Pas de sécheresse
2020	0,2	Pas de sécheresse	1,3	Pas de sécheresse
2021	0,1	Pas de sécheresse	1,3	Pas de sécheresse
2022	-0,2	Sécheresse légère	1	Pas de sécheresse

7.3.2. Analyse de l'influence de la pluviométrie sur les écoulements

L'analyse des figures 57 et 58 montre que quelle que soit l'année hydrologique (humide ou sèche), les périodes d'écoulement de l'eau sur les bassins versants coïncident avec celles des fortes pluies ou de la succession d'événements pluvieux relativement rapprochés. Toute absence de pluie conduit à de faibles écoulements voire nuls. Il existe tout de même des pluies de début de saison qui n'engendrent pas d'écoulement. Sur le bassin versant du N'Zo à Kahin et du Sassandra à Piébli, les pics hydrologiques sont décalés avec les pics pluviométriques. La pluviométrie atteint son pic en août à Man et Odienné. Quant aux écoulements, ils atteignent leur pic en septembre.

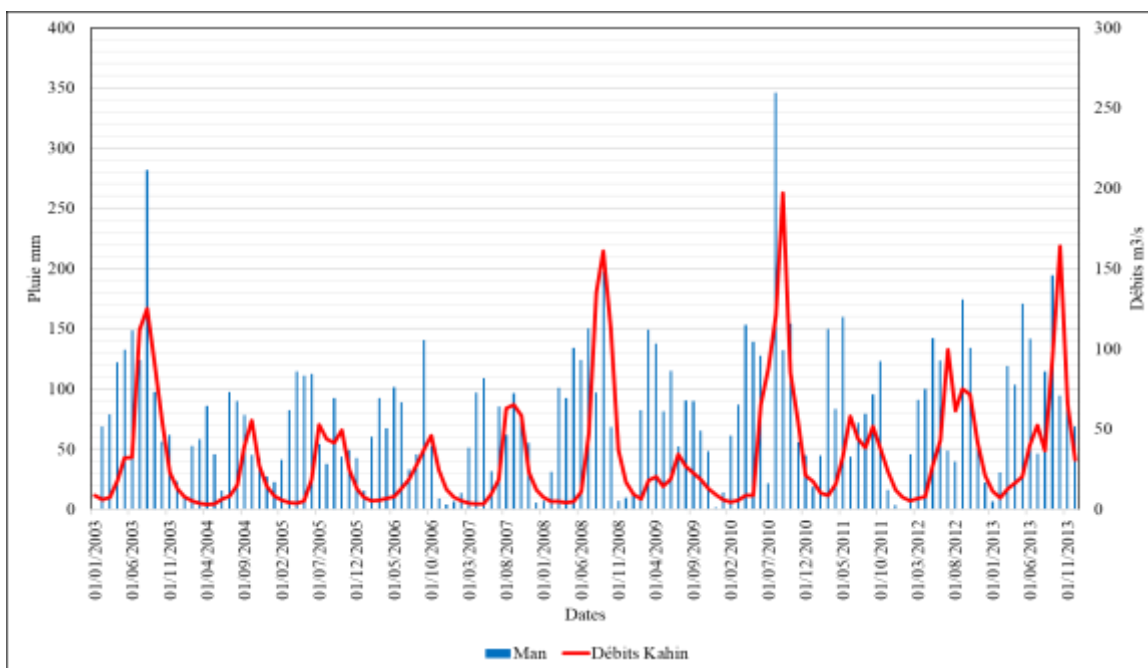


Figure 57 : Profils pluviométriques et de débit sur le bassin versant de la rivière N'Zo   Kahin

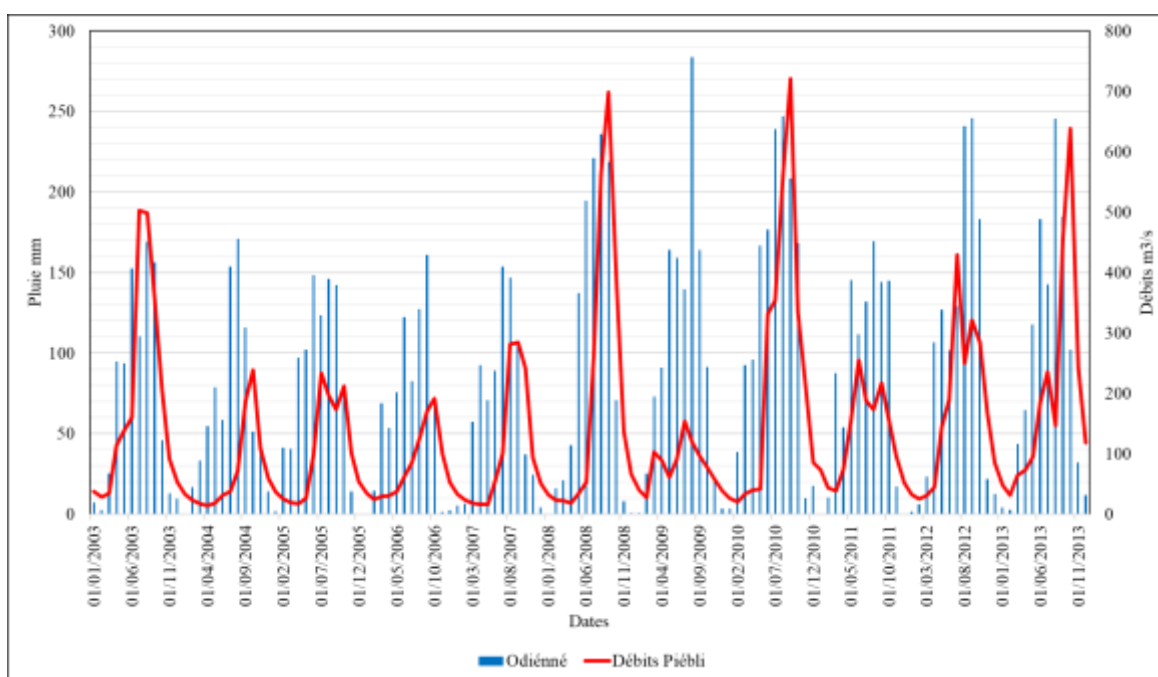


Figure 58 : Profils pluviométriques et de débit sur le bassin versant du fleuve Sassandra   Piébli

7.4. Impacts projetés du climat sur la production d'énergie hydroélectrique

7.4.1. Pluviométrie

La figure 59 présente les caractéristiques des indices pluviométriques projetés de 2021 à 2060 et leurs impacts potentiels. Ainsi, en se focalisant sur les années où l'intensité de la sécheresse a été marquée pour un seuil de SPI inférieur à (-1,0), on note les modifications suivantes :

Sous le scénario RCP4.5, les années 2023 (SPI = -1,9), 2029 (SPI = -1,6), 2033 (SPI = -2,3) et 2041 (SPI = -1,7) pourraient connaître des sécheresses sévères à extrêmes. Quant au scénario RCP8.5, les années 2021 (SPI = -1,7), 2028 (SPI = -1,0), 2040 (SPI = -1,0), 2041 (SPI = -1,3), 2058 (SPI = -1,5) et 2059 (SPI = -1,2) pourraient connaître des sécheresses sévères à extrêmes.

Ces années sont susceptibles de connaître une réduction significative des précipitations, entraînant une baisse substantielle du niveau des rivières et des réservoirs. Cela conduira à une diminution du potentiel de production hydroélectrique. Sous le scénario RCP 4.5, l'année 2033 (SPI = -2,3) enregistre une réduction drastique des précipitations attendues, pouvant impacter sévèrement la disponibilité de l'eau de la retenue du barrage hydroélectrique de Buyo.

Sous le scénario RCP 8.5, les années à venir montrent également des périodes significatives de sécheresse. Il s'agit des années comme 2021 et 2058, avec des SPI de -1.7 et -1.5 respectivement, signalent des périodes de stress hydrique important. Ces périodes pourraient affecter négativement le potentiel hydroélectrique en raison de la diminution de l'apport en eau.

Ainsi, pour le comportement probable de la lame d'eau et donc du potentiel de production hydroélectrique, il convient de noter que les précipitations sont l'un des principaux facteurs qui influencent la disponibilité en eau pour la production hydroélectrique.

Dans les années où la sécheresse est prévue être modérée à extrême, il est probable que la lame d'eau soit inférieure à la normale, ce qui pourrait entraîner une réduction de la production hydroélectrique.

Cependant, d'autres facteurs tels que la gestion de l'eau et la capacité de stockage peuvent également jouer un rôle important dans la détermination de la production hydroélectrique réelle.

Dans l'ensemble, il est important de prendre en compte les prévisions de sécheresse et les impacts potentiels sur la production hydroélectrique dans la planification et la gestion des ressources en eau à long terme.

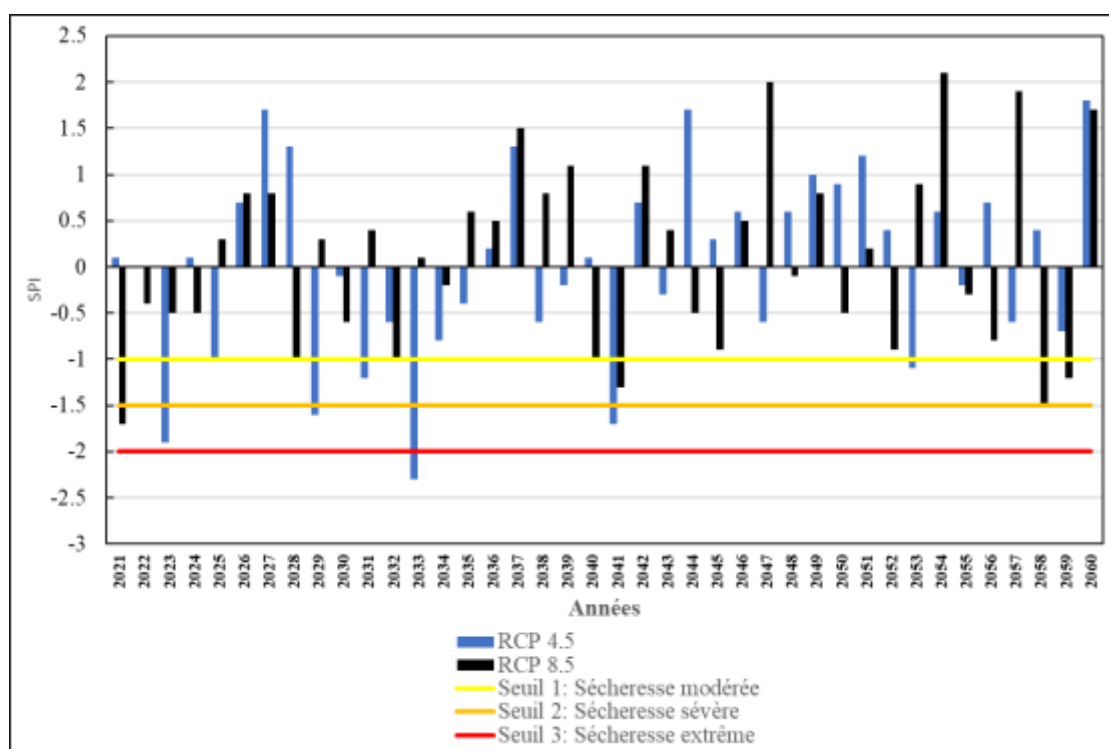


Figure 59 : Caractéristiques des indices pluviométriques projetés de 2021 à 2060

7.4.2. Température

La figure 60 présente les projections des écarts de températures selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de 2021 à 2060.

Les projections de température montrent une tendance générale à l'augmentation pour les deux scénarios. Ainsi, sous le scénario RCP4.5, la température enregistre une augmentation à un rythme modéré de $0,03^{\circ}\text{C}$ par an. Sous le scénario RCP8.5, l'augmentation de la température est plus rapide que sous le premier scénario, avec une pente de $0,05^{\circ}\text{C}$ par an. On note effet, que cette augmentation de température s'accompagne d'une variabilité interannuelle annuelle significative. Particulièrement sous le scénario RCP8.5, l'augmentation rapide des températures entraînera une évaporation accrue de l'eau de la retenue du barrage en particulier, et de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo en général. Également, les périodes de sécheresse plus fréquentes et intenses provoqueront ainsi un stress thermique sur les infrastructures hydroélectriques, réduisant leur efficacité et leur durée de vie.

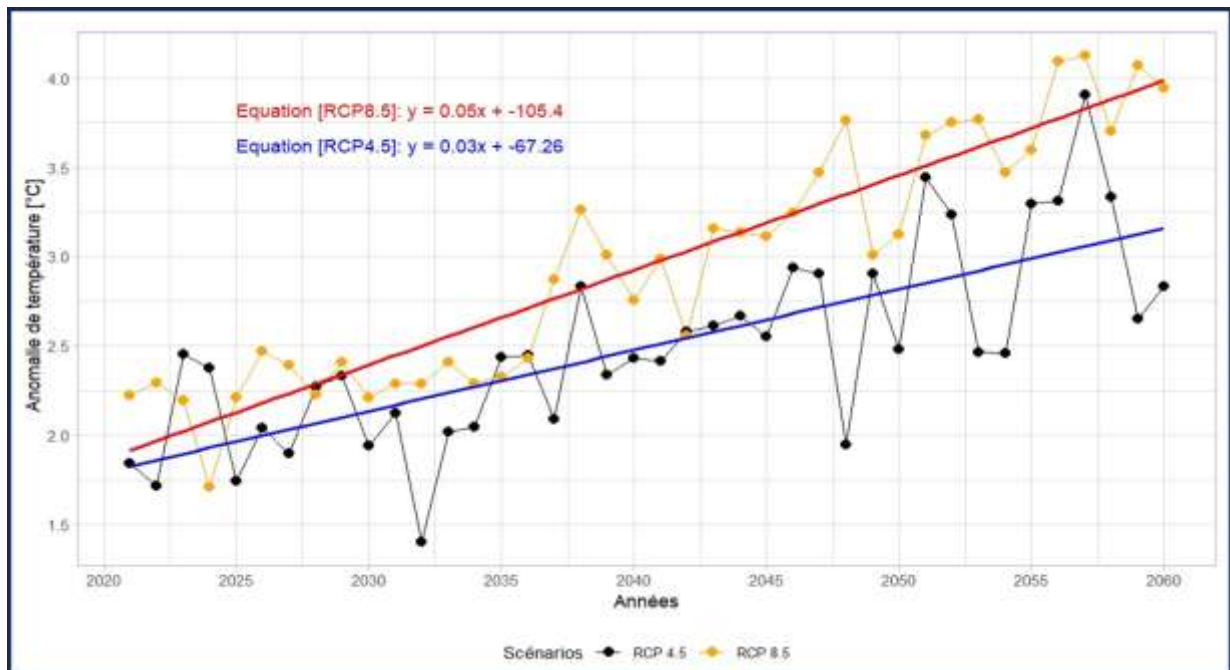


Figure 60 : Anomalies de températures projetées dans le bassin versant du fleuve Sassandra

Discussion

L'analyse des paramètres climatiques sur le bassin versant a révélé une variabilité climatique sur l'ensemble du bassin. Cela démontre que la zone a été le siège de plusieurs années de sécheresse classée de modérée à sévère au cours de la période de 1981 à 2022. Ce bassin a connu un déficit pluviométrique moyen de 12% à Daloa, où 10/42 années soit 23,8% du temps, les sécheresses sévères à extrêmes ont été observées. À Odienné, le déficit pluviométrique moyen a été de 4% à Odienné, où 08/42 soit 19,5% du temps, les sécheresses sévères à extrêmes ont été observées. À Man, c'est un excédent pluviométrique moyen de 5% qui a été observé bien que des périodes de sécheresse modérée à extrême sur 11% du temps aient été enregistrées notamment de 2004 à 2012. Ces résultats s'accordent avec ceux des recherches de Goula *et al.* (2006), Amani *et al.* (2010), Faye (2013), Soro *et al.* (2014) et celles de Faye *et al.* (2015)

Au niveau de la thermométrie, le réchauffement moyen au niveau du bassin versant de 1981 à 2022, indique une hausse de température de 0,2°C, 0,6°C, 0,7°C respectivement à Daloa, Odienné et Man. Pour les périodes 1991-2022 et 2001-2022, ces hausses passent de 0,2°C à 0,4°C à Daloa, de 0,6°C à 0,8°C à Odienné, de 0,7°C à 1°C à Man, soit une hausse de température de 0,1°C par décennie. Ces variations climatiques ont été exacerbées par la récurrence du phénomène El Niño, phénomène climatique d'échelle globale. En effet, sur la même période de 42 ans, ce phénomène a impacté fortement la variabilité des paramètres climatiques en 24 années sur 42, soit environ 57% de la période. Les épisodes d'El Niño entre 1980 et 2023 sont bien documentés par l'OMM (GIEC, 2023) qui indique que 8 principaux épisodes d'El Niño ont eu des impacts assez significatifs dans les différentes zones du monde. En Côte d'Ivoire, des nombreuses études de Vei et Djè (2012) ont souligné les impacts sur le climat à l'échelle nationale. Par conséquent, les effets combinés de températures élevées et de faibles précipitations peuvent diminuer la capacité du réservoir de Buyo à maintenir des niveaux d'eau suffisants pour une production énergétique optimale.

Toutes ces perturbations climatiques ont entraîné des répercussions sur les lames d'eau écoulées et partant sur les côtes d'eau de production du barrage hydroélectrique de Buyo en faisant passer les côtes de production en dessous du seuil minimal de production. En effet, les années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022 ont atteint le niveau de "crise", avec des mois spécifiques où l'indice de la lame d'eau efficace est tombé en dessous du seuil critique de 0,22. Une attention particulière est portée sur la période de mars à août, qui semble particulièrement vulnérable à la crise. Cette observation laisse entrevoir une éventuelle corrélation avec des

fluctuations climatiques ou des événements météorologiques spécifiques, comme le phénomène El Niño. Cependant, la sécheresse climatique de la même année ne coïncide pas toujours avec les niveaux minima de production. Cela pourrait s'expliquer par la persistance des sécheresses des années antérieures (Goula *et al.*, 2006). La réponse hydrologique des bassins est conditionnée par la variabilité climatique et les mutations dans l'occupation du sol. L'amorce des écoulements sur les bassins sont essentiellement liés à la distribution spatiale et temporelle des précipitations. Le maintien des écoulements est conditionné par les conditions thermiques et hydriques. Ces résultats sont en adéquation avec ceux de Kouadio (2011) sur les bassins versants de l'Agnéby et du Boubo en Côte d'Ivoire. Le décalage qui existe entre les déficits pluviométriques et hydrométriques pourrait être lié à un déficit d'alimentation des cours d'eau par les nappes et aussi aux mutations de la surface des bassins tel que souligné par Servat *et al.* (1998).

Les résultats sur les impacts projetés du climat sur la production d'énergie hydroélectrique ont révélé les résultats suivants. Selon le scénario RCP 4.5, les années 2023 (SPI = -1,9), 2029 (SPI = 1,6), 2033 (SPI = -2,3) et 2041 (SPI = -1,7) pourraient connaître des sécheresses sévères à extrêmes. Quant au scénario RCP 8.5, les années 2021 (SPI = -1,7), 2028 (SPI = -1,0), 2040 (SPI = 1,0), 2041 (SPI = -1,3), 2058 (SPI = -1,5) et 2059 (SPI = -1,2) pourraient connaître des sécheresses sévères à extrêmes. Coulibaly *et al.* (2018) après avoir considéré les mêmes périodes que cette étude, ont observé des baisses sur le bassin versant. Koua *et al.* (2019), ont étudié la période de 2035 à 2064 comme horizon 2050 et ont pu observer une baisse des précipitations de 34%. Les résultats s'accordent en indiquant des baisses de la pluviométrie qui pourraient traduire des situations de sécheresse que pourrait subir le bassin versant. Cette sécheresse pourrait affecter négativement le potentiel hydroélectrique en raison de la diminution de l'apport en eau dans la retenue en ayant un impact sur les écoulements qui constituent la matière première de la production de l'énergie hydraulique.

Conclusion partielle

L'évaluation des impacts des changements climatiques sur la production d'énergie du barrage hydroélectrique de Buyo a permis de montrer que :

- les années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022, se distinguent par une variabilité plus marquée que d'autres. Ces années ont atteint le niveau de "crise", avec des mois spécifiques où l'indice de la lame d'eau efficace est tombé en dessous du seuil critique de 0,22 ;

- les années où le niveau d'eau a atteint le seuil de crise coïncident avec des années de sécheresses climatiques ;
- les projections futures du climat indiquent selon les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5, de fortes variations de la pluviométrie et des températures qui entraîneront des sécheresses sévères à extrêmes respectivement au cours des années 2023, 2029, 2041 et 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 et 2059.

Ainsi, au cours des années où la sécheresse est prévue pour être modérée à extrême, il y a une forte probabilité que la lame d'eau soit inférieure à la normale, ce qui pourrait entraîner une réduction de la production hydroélectrique.

CONCLUSION

L'objectif de cette thèse est de montrer l'impact des changements hydro-climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo sur la production de l'électricité du barrage. Pour mener à bien ce travail, trois objectifs spécifiques ont été fixés : d'abord, caractériser la variabilité hydro-climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo. Ensuite, caractériser la variabilité hydro-climatique future dans le bassin versant aux horizons 2030 et 2050. Enfin, évaluer les impacts des changements climatiques sur la production de l'énergie du barrage hydroélectrique de Buyo.

La caractérisation de la variabilité hydro-climatique du bassin versant a permis dans un premier temps de relever des conditions prolongées de déficits pluviométriques et hydrométriques entamées depuis les années 1970 sur l'ensemble du bassin. Les résultats ont également mis en évidence la profonde modification des régimes hydrologiques. Dans un second temps, cette caractérisation a permis de comprendre l'évolution de la pluie dans la zone d'étude par l'analyse des normales et décennales pluviométriques. Ces résultats ont pu montrer que la décennie 2011-2020 est caractérisée par un retour de la pluviométrie par rapport à la normale.

Concernant la caractérisation hydro-climatique future, elle a permis de choisir et valider des modèles climatiques régionaux issus de la base de données CORDEX-Afrique afin de décrire le climat futur du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo. Le choix des modèles a été fait par la méthode du diagramme de Taylor associé au profil saisonnier des modèles et des observations. Ainsi, les sorties des modèles retenus ont été corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) à l'aide de l'outil CMhyd. Suite aux corrections, les changements potentiels du climat futur ont été évalués par l'analyse des changements prédits par les modèles. L'étude révèle que les modèles ICHEC, IPSL et NCC ont une bonne aptitude à simuler le climat du bassin. La simulation du climat montre des variations des paramètres climatiques. Le scénario RCP 4.5, prévoit des fluctuations de la pluviométrie de -20,8 % à +58,1 % à l'horizon 2030 et de -18,8 % à +61,7 % à l'horizon 2050. Le RCP 8.5 prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4 % à +43,8 % à l'horizon 2030 et de -7,5 % à +73,3 % à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1,6 à +4,4°C pour le RCP 4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP8.5. L'analyse des résultats des écoulements simulés permet de noter au niveau mensuel ou saisonnier, la conservation du régime hydrologique. Les modifications s'observent plus sur le volume écoulé. Également, ces résultats indiquent une baisse du volume des écoulements à l'horizon 2050, selon le RCP4.5. Au niveau des écoulement annuels, les résultats montrent des hausses par rapport à la période 1981-2010. Au cours des années futures, il est prévu des

augmentations des écoulements à l'horizon 2030 de 55 % selon le scénario RCP4.5, soit une lame d'eau de 0,22 mm/j (99,3 m³/s) et de 53 % selon le scénario RCP 8.5, soit une lame d'eau de 0,21 mm/j (95,4 m³/s). Pour l'horizon 2050, le scénario RCP 4.5 prévoit une augmentation des débits moyens annuels de 2 %, soit une lame d'eau de 0,01 mm/j (4,2 m³/s), le scénario RCP8.5 quant à lui prévoit une augmentation de 43 %, soit une lame d'eau de 0,17 mm/j (77,6 m³/s). Toutefois, par rapport à l'horizon 2030, les écoulements sont en baisse de 95,1 m³/s soit 33% selon le RCP 4.5 et de 17,8 m³/s, soit 7% selon le RCP 8.5.

Pour évaluer les impacts présents et futurs des changements climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique au barrage de Buyo, l'analyse s'est concentrée sur les variations pluviométriques et les variations thermiques. Les résultats révèlent que les années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022, se distinguent par une variabilité plus marquée que d'autres. Ces années ont atteint le niveau de "crise", avec des mois spécifiques où l'indice de la lame d'eau efficace est tombé en dessous du seuil critique de 0,22. Ces années ont coïncidé avec des années de sécheresses climatiques. Les résultats ont également montré que les projections futures du climat indiquent de fortes variations de la pluviométrie et des températures qui entraîneraient des sécheresses sévères à extrêmes au cours des années 2023, 2029, 2041 selon le scénario RCP 4.5 et de 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 et 2059 selon le scénario RCP 8.5. Par conséquent, au cours des années où la sécheresse serait dans les classes de modérée à extrême, la lame d'eau pourrait être inférieure à la normale, ce qui pourrait entraîner une réduction de la production hydroélectrique.

Malgré les nombreuses connaissances acquises de l'impact du climat sur la production de l'énergie hydroélectrique au barrage de Buyo, des perspectives et recommandations subsistent.

Perspectives

En guise de perspectives, nous soulignons que des travaux complémentaires s'avèrent nécessaires.

Ces études concernent :

- la caractérisation des changements de régimes hydro-climatiques à des échelles de temps et d'espace plus fines pour tenir compte des spécificités intrinsèques des bassins versants étudiés ;
- l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) comme nouveau outil pertinent dans la prise en compte des changements opérés dans la réponse des bassins versants, et partant favoriser une gestion optimale de l'eau pour divers usages ;

- la caractérisation de l'influence anthropique, la problématique de l'érosion et de la sédimentation dans les bassins versants et autres facteurs exogènes pouvant impacter la disponibilité de l'eau dans les réservoirs artificiels et naturels ;
- la transposition de résultats d'expériences acquises sur d'autres bassins versants et sous diverses conditions climatiques pour définir des indicateurs robustes et transférables dans le cadre d'une utilisation opérationnelle dans la planification et la gestion de l'eau.

Recommandations

En vue d'améliorer la production de l'énergie hydroélectrique, nous recommandons :

- à la Direction générale de l'hydraulique de renforcer des réseaux de mesure de débits sur les cours d'eau en implantant des stations hydrométriques à l'entrée des barrages hydroélectriques ;
- la mise en place de cadre d'échanges regroupant la Sous-Direction de l'hydrologie, la Direction Générale des Ressources en Eau, CI-Energie, la CIE, la SODEXAM et les structures de recherche pour une gestion optimale des eaux dans les bassins versants bénéficiant de barrages de production de l'énergie hydroélectrique ;
- l'identification et la quantification des points d'eau dans les grands bassins versants tels que les barrages de production d'eau potable, les barrages à vocation agricole ou autres pour leur prise en compte dans une gestion intégrée de l'eau.

RÉFÉRENCES

- hr/>
- Abdelkader O., Kamila B. H. & Abderrazak B. (2019). Apport de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation hydrologique et les sous-produits du bilan hydrologique : cas du bassin versant de l'aval Mekerra, Algérie. *Revue des sciences de l'eau Journal of Water Science*, 32(2) : 117-144.
- Adja M.G. (2009). Étude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla (milieux soudano-sahéliens au nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 200 p.
- Aguilar E., Aziz B. A., Brunet M., Ekan L., Fernandes A., Massoukina M., Mbah J., Mhanda A., Do Nascimento D.J. & Peterson T.C. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114(2) : 1-11.
- Aguilar-Saavedra J.A. (2009). Identifying top partners at LHC. *Journal of High Energy Physics*, 2009(11) : 1–30.
- Al Hamndou D. & Requier-Desjardins M. (2008). Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : s'adapter, une approche intégrée. *VertigO la revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(1) : 1-22.
- Alhassane A., Salack S., Ly M., Lona I., Traoré S.B. & Sarr B. (2013). Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse*, 24(4) : 282-293.
- Ali A. & Lebel T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology : A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(12) : 1705-1714.
- Allan R., Lindesay J. & Parker D. (1996). El Niño southern oscillation & climatic variability. CSIRO Publishing, Sydney, Australie, 405 p.
- Amani M. K., Koffi F. K., Yao B. K., Kouakou B. D., Jean E. P. & Sekouba O. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog : European Journal of Geography*, 513(2010) : 2-7.
- Ambroise B. (1991). Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré-processus et modeles. Les Flux, dans les Volumes Pédologiques et à leurs Limites : Approches à l'Echelle Spatiale du Bassin Versant. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 11(4) : 721-725.
- Ancey G. & Pescay M. (1984). La planification à base régionale en Côte d'Ivoire. Le plan 1981-1985 et ses antécédents. IRD, Paris (France), 138p.
- Anderson, R. J., Smith, J., & Patel, K. (2025). Hydro-geomorphological impacts of large dams in Africa: A systematic review. *Earth-Science Reviews*, 262, 105048. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105048>

- Anderson, Y. K., Konan, K. Y. A., Bamba, M., N’Zi, G. K., & Koné, T. (2021). Impact des aménagements hydroélectriques sur le peuplement des poissons du lac de barrage de Buyo et de la zone périphérique (Côte d’Ivoire). *European Scientific Journal*, 17(40), 273–292. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n40p273>
- Andréassian V., Perrin C., Berthet L., Ma N., Lerat J., Loumagne C., Oudin L., Mathevet T., Ramos M.-H. & Valéry A. (2009). HESS Opinions ‘ Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10) : 1757-1764.
- Argüeso D., Evans J.P. & Fita L. (2013). Precipitation bias correction of very high resolution regional climate models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11) : 4379–4388.
- Arnaud M. & Emery X. (2000). Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. *Cirad - Agritrop*, Hermès, Paris (France), 221 p.
- Arnold J.G., Allen P.M. & Bernhardt G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1–4) : 47–69.
- Baillargeon S. (2005). Le krigeage : revue de la théorie et application à l’interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire De Maitrise, Université de Laval (Quebec, Canada), 137 p.
- Banque Mondiale (2023). Rapport national sur le climat et le développement : Côte d’Ivoire, Washington, USA, 139 p.
- Bardin A.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (France), 440 p.
- Bardin A.S., Dezetter A., Servat E. & Mahé G. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique. In: Regional hydrological impacts of climatic change: hydroclimatic variability: proceedings of symposium, IST / IRD, Paris (France) : 194-202.
- Basheer, M., Nechifor, V., Calzadilla, A., et al. (2021). Collaborative management of the Grand Ethiopian Renaissance Dam increases economic benefits and resilience. *Nature Communications*, 12, 5622. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25877-w>
- Benkaci A. (2006). Modélisation pluie-débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique d’Alger, Algérie, 220 p.
- 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) : 205–213.
- Bhalme H.N. & Mooley D.A. (1979). On the performance of modified Palmer index. *Archives for Meteorology Geophysics and Bioclimatology Series B Theoretical and Applied Climatology*, 27(4) : 281–295.

- Birol F. (2011). *Energy for all : financing access for the poor*. Oxford (Angleterre), 206 p.
- Bisht D.S., Mohite A.R., Jena P.P., Khatun A., Chatterjee C., Raghuwanshi N.S., Singh R. & Sahoo B. (2020). Impact of climate change on streamflow regime of a large Indian river basin using a novel monthly hybrid bias correction technique and a conceptual modeling framework. *Journal of Hydrology*, 590(3) : 125–148.
- Block P.J., Souza Filho F.A., Sun L. & Kwon H.-H. (2009). A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(4) : 828–843.
- Bodian A., Dacosta H. & Dezetter A. (2011). Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 5 : 107–124.
- Borrell E.V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse De Doctorat, INP Toulouse (Toulouse, France), 254 p.
- Bouanani R., Baba-Hamed K., Bouanani A. (2013). Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : cas du bassin d'Oued Sikkak (NW algérien). *Nature & Technologie, C- Sciences de l'Environnement*, N° 09, pp. 61-66.
- Bourgin P.-Y. & Chenet R.M. (2015). Etat et perspectives d'aménagement du bassin du Sassandra en Côte d'Ivoire. *Conférence Internationale sur l'hydrologie des grands bassins Africains Hammamet*, 26-30 Octobre 2015, Tunisie, 24 p.
- Bourgin P.-Y. (2019). Modèle intégré du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Sassandra. *La Houille Blanche*, (5–6) : 124–139.
- Brandt M., Bergström S. & Gardelin M. (1988). Modelling the effects of clearcutting on runoff-examples from central Sweden. *Ambio;(Sweden)*, 17(5) : 307–313.
- Brou Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire De Maitrise, Université des Sciences et Technologies de Lille (France), 213 p.
- Brou Y.T., Akindès F. & Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*, 14(6) : 8.
- Brou Y.T., Servat E. & Paturel J.-E. (1998). Contribution à l'analyse des inter-relations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du Sud forestier ivoirien. *Water Resources Variability in Africa during the XXIII Century*, 3(252) : 365–373.
- Brulebois E. (2016). Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatifs et qualitatifs. Thèse Unique De Doctorat, Université de Bourgogne (France), 323 p.
- Camus H. (1969). Hydrologie du bassin du Sassandra (Note préliminaire). *Centre O.R.S.T.O.M, d'Adiopodoumé-Côte d'Ivoire, Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-*

-
- Mer*, 5(69) : 1-54.
- Cantat O. (1995). Variabilité et variation climatiques en Normandie L'évolution récente des températures à Caen-Carpiquet. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(3) : 273-279.
- Castro C.V. & Maidment D.R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling & Software*, 130 (2) : 104-732.
- Comby J. (1998). Les paroxysmes pluviométriques dans le couloir rhodanien et ses marges. Thèse De Doctorat, Lyon 3 (France), 528 p.
- Cornish P.M. (1993). The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, 150(4) : 301-322.
- Cosandey C.L. (1993). Conséquences hydrologiques d'une coupe forestière. Le cas du bassin de la Latte (mont Lozère, France). In : *L'eau, la terre et les hommes. Au fil de l'eau*, pp. 355–363.
- Cosandey C.L., Martin C. & Didon-Lescot J. F. (2000). Forêt et écoulements : étude d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel, les crues et les étiages, Rapport sectoriel pour le rapport final du contrat européen FOREX, 34 p.
- Coulibaly N., Coulibaly T., Mpakama Z. & Savané I. (2018). The Impact of Climate Change on Water Resource Availability in a Trans-Boundary Basin in West Africa : The Case of Sassandra. *Hydrology*, 5(1) : 1-12.
- Coustau M., Rousset-Regimbeau F., Thirel G., Habets F., Janet B., Martin E., de Saint-Aubin C. & Soubeyroux J.-M. (2015). Impact of improved meteorological forcing, profile of soil hydraulic conductivity and data assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France. *Journal of Hydrology*, 525 : 781–792.
- Covey C., AchutaRao K.M., Cubasch U., Jones P., Lambert S.J., Mann M.E., Phillips T.J. & Taylor K.E. (2003). An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Planetary Change*, 37(1-2) : 103-133.
- Croke B.F.W., Andrews F., Jakeman A.J., Cuddy S.M. & Luddy A. (2006). IHACRES Classic Plus : A redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. *Environmental Modelling & Software*, 21(3) : 426–427.
- Dechemi N., Ait Mouhoub D. et Souag D. (2000). Contribution à l'analyse du régime pluviométrique sur le littoral algérien. *Sécheresse*, 11, pp. 5-10.
- Dibi, B. (2008) Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) : Apport du SIG et de l'analyse multicritère. Thèses uniques de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 164 p.

- Diaconescu, E. P., et al. (2018). *Evaluation of CORDEX-Africa simulations for West African climate characteristics and interannual variability*. *Earth System Dynamics*, 9, 119–134.
- Didon-Lescot J.-F., Vincent B., Étienne D., Jean-Luc Jean-Luc Dupouey J.-L.D., Claude N., Party J.P., Marie-Pierre M., Turpault P. & Erwin U. (2023). Evolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies. *Revue forestière française*, 2(52) : 49-70.
- Diello P. (2007). Interrelation climat - homme - environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2 (France), 391 p.
- Dione O. (1998). Évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Thèse Unique De Doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin (Lyon, France), 438 p.
- Djè K.B. (2014). Document de stratégie du programme national changement climatique (2015-2020), Programme National Changement Climatique (PNCC), République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 184 p.
- Djellouli F., Bouanani A. & Baba-Hamed K. (2015). Caractérisation hydrologique du bassin d'oued louza a l'aide d'un modele pluie-debit global. *Larhyss Journal*, (23) : 275–286.
- Djouane S. (2015). Etude de la sécheresse climatique dans les hauts plateaux de l'Algérie, par deux approches : Analyse statistique et images satellitaires. Mémoire De Master, Université Hamma Lakhdar d'El Oued (Algérie), 59 p.
- Donat M.G., Alexander L.V., Yang H., Durre I., Vose R., Dunn R.J., Willett K.M., Aguilar E., Brunet M. & Caesar J. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century : The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(5) : 2098-2118.
- Duan Z., Møller N. & Weare J.H. (1992). An equation of state for the CH₄-CO₂-H₂O system : I. Pure systems from 0 to 1000 C and 0 to 8000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7) : 2605-2617.
- Enfield D.B. (1989). El Niño, past and present. *Reviews of Geophysics*, 27(1) : 159-187.
- Faye B., Senoussi H. & Jaouad M. (2017). Le dromadaire et l'oasis : du caravansérail à l'élevage périurbain. *Cahiers Agricultures*, 1(26) : 1-8.
- Faye C. (2013). Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydro climatique : cas du bassin versant de la Falémé. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 309 p.
- Faye C. (2017). Une évaluation comparative des séquences du stress hydrique et de la sécheresse par indicateurs et par échelles de temps dans le bassin du Bafing en amont de Manantali. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 1(19) : 171-188.

-
- Faye C., Diop E.H.S. & Mbaye I. (2015). Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés. *Belgeo. Revue belge de géographie*, (4) : 1-26.
- Faye C., Sow A.A. & N'Dong J.B. (2013). Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, (9) : 17-35.
- Galdos V.F. (2006). Application d'un modèle hydrologique global à un bassin versant de haute montagne tropicale (Cordillère Blanche - Pérou) ». Mémoire de Matser, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 52 p.
- Gates W.L., Boyle J.S., Covey C., Dease C.G., Doutriaux C.M., Drach R.S., Fiorino M., Gleckler P.J., Hnilo J.J., Marlais S.M., Phillips T.J., Potter G.L., Santer B.D., Sperber K.R., Taylor K.E., Williams D.N. (1999). An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bulletin of the American Meteorological Society*, (80) : 29-55.
- Gaume E. (2007). Elements d'analyse sur les crues éclair. Thèse De Doctorat, Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts (Québec (Canada)), 360 p.
- Ghaffari G., Keesstra S., Ghodousi J. & Ahmadi H. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24(7) : 892-903.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Rapport établi par le Groupe de travail des stratégies de parade du GIEC, 114 p.
- GIEC (2023). Impacts, options d'adaptation et domaines d'investissement pour une Afrique de l'Ouest résiliente au changement climatique, 6^e rapport d'évaluation établi par le Groupe de travail des stratégies de parade du GIEC, 20 p.
- Girard G. & Sircoulon J. (1968). Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. Centre O.R.S.T.O.M, d'Adiopodoumé-Côte d'Ivoire, Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, 5(69) : 1-54.
- Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf P. (1970). Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer : 56 p.
- Goula B.T.A. (1993). Modélisation hydrologique de bassins versants équipés d'ouvrages hydrauliques en zone soudano-sahélienne : application au Massili (Burkina-Faso). Thèse de Doctorat, École normale de musique de Paris (Paris, France), 178 p.
- Goula B.T.A., Savane I., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire

- (Afrique tropicale humide). *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 7(1) : 1–19.
- Guibert C. & Debreu J. (2013). Livre Blanc des énergies durables en Afrique, guide des bonnes pratiques, MKF éditions, Italie, 144 p.
- Guillaumet, J.L., & Adjanohoun, E. (1971). La végétation de la Côte d'Ivoire : secteurs ombrophile et mésophile. ORSTOM-Adiopodoumé, 103 p.
- Guivarch C. & Cassen C. (2015). L'atténuation du changement climatique : retour sur le 5e rapport du Giec. *La Météorologie*, 2015(88) : 97–105.
- Halwatura D. & Najim M.M.M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software*, 46: 155–162.
- Harris J.M., Roach B. & Codur A.-M. (2017). L'Économie du Changement Climatique Mondial. Medford, USA, 87 p.
- Hayes S.C., Wilson K.G., Gifford E.V., Follette V.M. & Strosahl K. (1996). Experiential avoidance and behavioral disorders : A functional dimensional approach to diagnosis and treatment. *Journal of consulting and clinical psychology*, 64(6) : 1152–1168.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D. & New M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(20) : 1-12.
- Haziza E. (2007). Contribution au développement de stratégies préventives face au risque de crues éclairs. Thèse De Doctorat, École des Mines de Paris, France, 409 p.
- Heinzeller D., Dieng D., Smiatek G., Olusegun C., Klein C., Hamann I., Salack S., Bliefernicht J. & Kunstmann H. (2018). The WASCAL high-resolution regional climate simulation ensemble for West Africa : concept, dissemination and assessment. *Earth System Science Data*, 10(2) : 815–835.
- Hengl T., Heuvelink G.B. & Rossiter D.G. (2007). About regression-kriging : From equations to case studies. *Computers & geosciences*, 33(10) : 1301–1315.
- Higy C. (2000). Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques. Thèse De Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (France), 338 p.
- Hountondji Y.-C., De Longueville F. & Ozer P. (2011). Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change, Cotonou, Bénin pp. 1–7.
- Hubert P. & Carbonnel J.-P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 95(1–2) : 165–183.

- Im S., Kim H., Kim C. & Jang C. (2009). Assessing the impacts of land use changes on watershed hydrology using MIKE SHE. *Environmental Geology*, 57(1) : 231–239.
- IPCC (2008). Climate Change and Water. Rapport Technique IV, 214 p.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M. & Wavresky P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 503(1) : 1-32.
- Jones D.L., Murphy D.V., Khalid M., Ahmad W., Edwards-Jones G. & DeLuca T.H. (2011). Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8) : 1723-1731.
- Jouilil I., Bitar K., Salama H., Amraoui A., Mokssit A. & Tahiri M. (2012). Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA durant les dernières décennies. *LARHYSS Journal*, 1(12) : 107-127.
- Jourda J.P.R. (2009). Etude de faisabilité des forages manuels en Côte d'Ivoire : collecte, organisation et analyse des données en vue de la définition des zones favorables. Rapport Préliminaire, UFR-STRM, Laboratoire de Télédétection et de l'Analyse spatiale Appliquée à l'Hydrogéologie (Abidjan, Côte d'Ivoire), 54 p.
- Kadio E. (1989). Etudes géologiques et géochimiques des occurrences nickélifères, super gènes au Nord-ouest de Biankouma (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 270 p.
- Kamagaté B., Dao A., Noufé D., Yao K.L., Fadika V., Goné D.L. & Savané I. (2017). Contribution du modèle GR4J à la modélisation hydrologique du bassin versant de l'Agneby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 29(1) : 187–208.
- Katz R.W. (1999). Extreme value theory for precipitation : sensitivity analysis for climate change. *Advances in water resources*, 23(2) : 133-139.
- Kiprotich P., Wei X., Zhang Z., Ngigi T., Qiu F. & Wang L. (2021). Assessing the Impact of Land Use and Climate Change on Surface Runoff Response Using Gridded Observations and SWAT+. *Hydrology*, 8(1) : 48.
- Konan B. (2001). Modélisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 146 p.
- Konan, K. Y. A., Bamba, M., Anderson, Y. K., et al. (2025). Impact of Climate Variability on Hydroelectric Power Generation: The Case of the Buyo Dam, Western Côte d'Ivoire. *International Journal of Environment and Climate Change*, 15(9), 536–553. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i95035>

- Koua T.J., Anoh K., Eblin S., Kouassi K., Kouamé K., Jourda J. (2019). Etude de la pluviométrie et du ruissellement en contexte de changement climatique dans le bassin versant du lac de Buyo (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Lahryss journal*, 39(2019) : 229-258.
- Koua T.J., Jourda J., Kouassi K., Anoh K., Balin D., Lane S. (2014). Potential climate change impacts on water resources in the Buyo Lake Basin (Southwest of Ivory Coast). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(3) : 1094-1111.
- Kouadio Z.A. (2011). Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 188 p.
- Kouakou K. E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse De Doctorat, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 170 p.
- Kouakou K.E., Albert G.B.T. & Issiaka S. (2005). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire-Burkina Faso). *Editorial Advisory Board*, 16(1) : 31-43.
- Kouakou K.E., Kouadio Z.A., Kouassi F.W., Bi T.G. & Savane I. (2014). Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10(1) : 145-160.
- Kouassi A.M., 2007. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Dje K.B., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog : European Journal of Geography*, 513(29) : 1-31.
- Kouyaté Z. (2020). Simulation et optimisation du fonctionnement d'un petit barrage et de son périmètre rizicole irrigué : cas de Nanan à Yamoussoukro. Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 241 p.
- Kuczera G. (1987). Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, 94(3-4) : 215-236.
- Laborde J.-P. (2000). Eléments d'hydrologie de surface. Nice, France, 202 p.
- Lavabre J., Sempere T. D. & Cernesson F. (1993). Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142 : 273-299.

-
- Le Houérou H.N. (1992). Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. *L'aridité, une contrainte au développement*, 34(2) : 197-220.
- Leblois E. & Bois P. (2000). Méthodes opérationnelles de synthèse climatologique des pluies fortes (évaluation et cartographie) Guide à usage des commanditaires et maîtres d'oeuvre. Paris, France, 205 p
- Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Ducharne A., Benoit M., Mignolet C., Schott C. & Mary B. (2007). Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS–MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment*, 375(1–3) : 33–47.
- Leka S., Griffiths A., Cox T. & Organization W.H. (2003). Work organisation and stress : systematic problem approaches for employers, managers and trade union representatives. World Health Organization, Londres, Angleterre, 33 p.
- Lepinas F. (2008). Impact du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat, Université Perpignan, 339 p.
- Madiodio N., Abel A. & Abou A. (2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau. Les zones humides et la désertification : élément de stratégies régionales de préparation et d'adaptation. 30(3) : 1-71.
- Mahé G. & Olivry J.-C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(1) : 109-117.
- Mahé G., Olivry J.-C & Servat E. (2015). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *IAHS Publication*, 46(2) : 169-177.
- Mangoua M.J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 169 p.
- Manton M.J., Della-Marta P.M., Haylock M.R., Hennessy K.J., Nicholls N., Chambers L.E., Collins D.A., Daw G., Finet A. & Gunawan D. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific : 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 21(3) : 269-284.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Californie, USA, pp 1-6.
- Mehdi B., Lehner B., Gombault C., Michaud A., Beaudin I., Sottile M.-F. & Blondlot A. (2015). Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water

- quality with and without adaptation management strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213 : 47–60.
- Mel F.G. (2003). Félix Houphouët-Boigny, L'épreuve du pouvoir. Karthala Editions, Abidjan, Côte d'Ivoire, 617 p.
- Michel C. & Edijatno T. (1991). Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. Rapport quadriennal 1987-1990 pour la XXème Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, Académie des Sciences de Paris, 4 p.
- Michel C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*, (1) : 39-44.
- Morin G., Paquet P. & Sochanski W. (1995). Modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, INRS-Eau, 341 p.
- Morton F.I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of hydrology*, 66(1-4) : 1-76.
- Muhindo S., Moeyersons J., Vandecasteele I., Trefois P. & Ozer P. (2012). Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 À 2010. *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 36(5) : 121-136.
- N'Go Y.A., Kouassi K.H., Soro G.E., Meledje H., Bi T.A.G. & Savané I. (2017). Dynamique et impact du climat sur les ressources hydriques et agricoles au sud-ouest de la Côte d'Ivoire/Dynamics and impact of the climate on the water and agricultural resources in the southwest of Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 19(2) : 304-314.
- N'Tcha M.Y. (2018). Évaluation de l'impact des changements climatiques et des changements d'utilisation / occupation des terres sur les ressources en eau du bassin de l'oueme à beterou à l'horizon 2050. Thèse De Doctorat, Institut national polytechnique félix houphouët-boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 197 p.
- Nalbantis I. & Tsakiris G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*, 23 : 881-897.
- Näschen K., Dieckrüger B., Evers M., Höllermann B., Steinbach S. & Thonfeld F. (2019). The Impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on Water Resources in a Tropical Catchment in Tanzania under Different Climate Change Scenarios. *Sustainability*, 11(24): 7083.
- Nascimento N.D.O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse De Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris, France), 420 p.

- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part IA discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3) : 282-290.
- New M., Hewitson B., Stephenson D.B., Tsiga A., Kruger A., Manhique A., Gomez B., Coelho C.A., Masisi D.N. & Kululanga E. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 111(14) : 1-11.
- Nikulin G., Jones C., Giorgi F., Asrar G., Büchner M., Cerezo-Mota R., Christensen O.B., Déqué M., Fernandez J. & Hänsler A. (2012). Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of Climate*, 25(18) : 6057-6078.
- Ossa-Moreno J., Keir G., McIntyre N., Cameletti M. & Rivera D. (2019). Comparison of approaches to interpolating climate observations in steep terrain with low-density gauging networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23 : 4763–4781.
- Ouarda T.B., Rasmussen P.F., Cantin J.-F., Bobée B., Laurence R. & Hoang V.D. (1999). Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12(2) : 425-448.
- Ouédraogo M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (France), 258 p.
- Oudin L. (2006). Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *La houille blanche*, 92(6) : 113-120.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. & Loumagne C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model ? : Part 2- Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(4) : 290-306.
- Ouedraogo M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257 p.
- Paturel J.-E., Servat É., Kouame B., Boyer J.-F., Lubes H. & Masson J.-M. (1995). Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(1) : 95–102.
- Paturel, J.E., 2014. Exercice de scénarisation hydrologique en Afrique de l'Ouest. Bassin du Bani. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (6) : 1135-1153
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit. Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG (Paris, France), 287 p.

-
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3–4), 275–301.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. Philander S.G. (1998). Who is El Niño ? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(13): 170–170.
- Piani C., Weedon G.P., Best M., Gomes S.M., Viterbo P., Hagemann S. & Haerter J.O. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of hydrology*, 395(3–4) : 199–215.
- Quesney A. (2003). Assimilation de mesures d’humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR. 16(2) : 173–197.
- Rakem Y. (1999). Analyse critique et reformulation mathématique d’un modèle pluie-débit (GR4). Thèse Unique De Doctorat, Marne-la-vallée, ENPC, 230 p.
- Rakotondrabe F. (2007). Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21 : cas du bassin versant de Morondava (Sud-ouest de Madagascar). Thèse De Doctorat, Université d’antananarivo école supérieure polytechnique d’antananarivo (Madagascar), 113 p.
- Rathjens H., Bieger K., Srinivasan R., Chaubey I. & Arnold J.G. (2016). CMhyd user manual. Doc. Prep. Simulated Climate Change Data Hydrologie Impact Study. Texas, USA, 17 p.
- Ravelo A.C., Fairbanks R.G. & Philander S.G.H. (1990). Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and an ocean model. *Paleoceanography*, 5(3) : 409-431.
- Refsgaard J.C. & Abbott M.B. (1996). The role of distributed hydrological modelling in water resources management. *Distributed hydrological modelling*, 35(2) : 1-16.
- Renard F. & Comby J. (2007). Caractérisation de l’aléa pluviométrique en milieu urbain à partir d’interpolations spatiales : le cas du Grand Lyon. *Climatologie*, 4 : 131-144.
- Rifai N., Khattabi A. & Rhazi L. (2014). Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d’une méthode de descente d’échelle statistique. *VertigO*, 14(3) : 1-16.
- Rudloff B. (2020). A stable country side for a stable country ? The effects of a DCFTA with the EU on Tunisian agriculture, SWP Research Paper, Tunis, Tunisie, 84 p.
- Sagna O. (2005). Lifelong learning in the African context : A practical example from Senegal. *Lifelong Learning & Distance Higher*, 28(1) : 236-250.

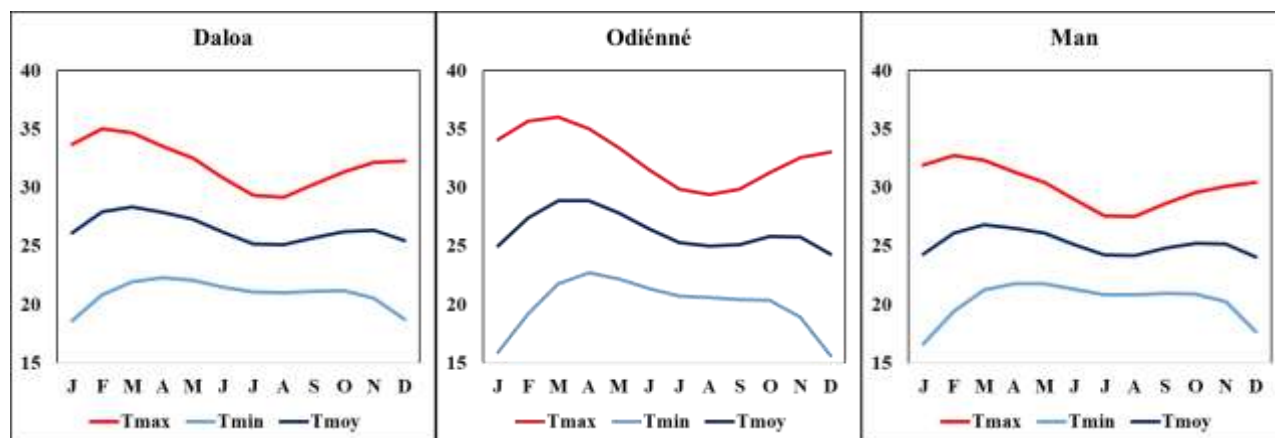
- hr/>
- Saint-Lu M. & Leloup J. (2016). Petit précis de théorie pour comprendre El Niño. *La Météorologie*, 95(8) : 30-38.
- Schoenau G.J. & Kehrigh R.A. (1990). Method for calculating degree-days to any base temperature. *Energy and buildings*, 14(4) : 299–302.
- Seidou O. (2017). Évaluation de la performance des modèles climatiques sur le Niger, Niamey, Niger, 65 p.
- Sennikovs J. & Bethers U. (2009). Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modelling. *18th World IMACS / MODSIM Congress, 13-17 July 2009*, Cairns, Australie, pp. 3962–3968.
- Servat E. & Sakho M. (1995). Méthodologie simplifiée d'évaluation comparative des performances d'un système d'eau aménagé confronté à la sécheresse : exemple de l'aménagement du Sassandra en Côte d'Ivoire. In : *of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems*, Boulder, USA, pp. 61–69.
- Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.-F., Lubes-Niel H., Fritsch J.-M., Masson J.-M. & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *IAHS publication*, 3(252) : 323–338.
- Servat E., Paturel J.E., Lubes-niel H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M. & Marieu B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2) : 363–387.
- ServatT E. et Dezetter A., 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese Savannah area. *Hydrological Sciences Journal*, 7 (2) : 129-142.
- Sharma T.C. & Panu U.S. (2010). Analytical procedures for weekly hydrological droughts : a case of Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(1) : 79–92.
- Sheffield J. & Wood E.F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31 : 79–105.
- Shrestha S. & Htut A.Y. (2016). Land Use and Climate Change Impacts on the Hydrology of the Bago River Basin, Myanmar. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6) : 819–833.
- Sighomnou D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse De Doctorat, Université de Yaoundé (Yaoundé, Cameroun), 192 p.

- Sircoulon J. (1976). Les données hydropluviométriques de la secheresse recente en afrique intertropicale. Comparaison avec les secheresses 1913 et 1940. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 13(2) : 75–174.
- Slingo J.M. & Annamalai H. (2000). 1997 : The El Niño of the century and the response of the Indian summer monsoon. *Monthly Weather Review*, 128(6) : 1778–1797.
- Soro G.E., Anouman G. L., Goula B. T. A., Shrohorou B., & Savane I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique a diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l’extrême Nord-ouest de la cote d’Ivoire. *Larhyss Journal*, 18 : 107-24.
- Soro G.E., Yao A.B., Kouame Y.M. & Bi T.A.G. (2017). Climate change and its impacts on water resources in the Bandama basin, Côte D’ivoire. *Hydrology*, 4(1) : 1–13.
- Soro T.D., Kouakou B.D., Kouassi E.A., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio K.E., Yéi M.-S.O. & Soro N. (2014). Hydroclimatologie et dynamique de l’occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d’Ivoire). *VertigO*, 13(3) : 1–26.
- Sorokoby V.M. (2013). Étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (sud-ouest de la Côte d’Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique. Thèse De Doctorat, Université Felix Houphouet Boigny (Abidjan, Côte d’Ivoire), 164 p.
- Sorooshian S. & Gupta V.K. (1983). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : The question of parameter observability and uniqueness. *Water resources research*, 19(1) : 260-268.
- Sorooshian S. (1991). Parameter estimation, model identification, and model validation : conceptual-type models. *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*, 345(3) : 443–467.
- Stângă L.C. (2009). Quantifier la sécheresse : durée, intensité, fréquence. OMM, Genève, Suisse, 52 p.
- Sylla M.B., Nikiema P.M., Gibba P., Kebe I. & Klutse N.A.B. (2016). Climate change over West Africa : Recent trends and futures projections. *Adaptation to climate change and variability in rural West Africa*, 38(2) : 25–40.
- Taylor K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research : atmospheres*, 106(7) : 7183–7192.
- Tedeschi R.G., Grimm A.M. & Cavalcanti I.F. (2015). Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology*, 35(8) : 2045–2064.
- Teutschbein C. & Seibert J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies : Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456(3) : 12–29.

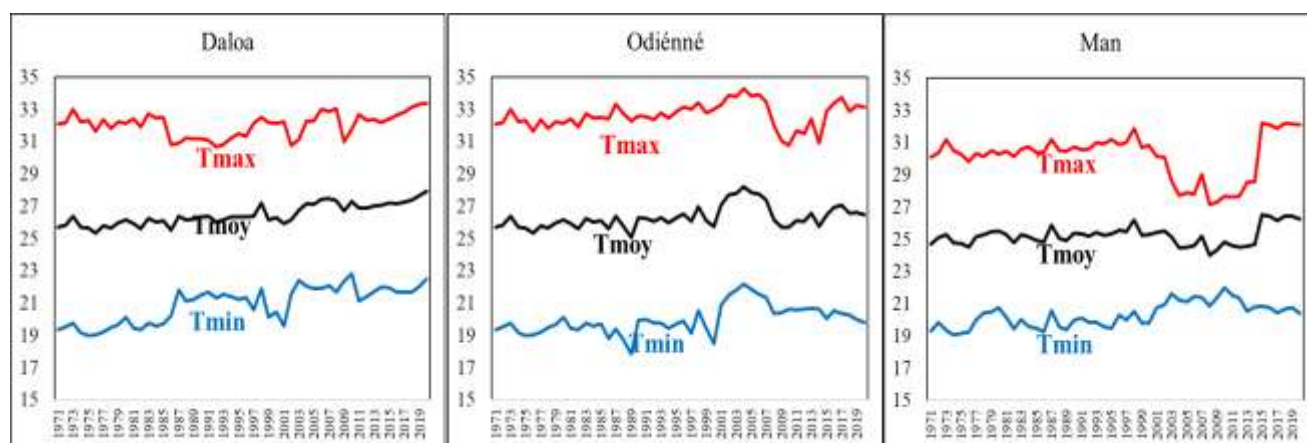
- Themeßl M.J., Gobiet A. & Heinrich G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112 : 449–468.
- Thiessen A.H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7) : 1082–1089.
- Thom H.C.S. (1958). “A Note on the Gamma Distribution” Statistical Laboratory. *Monthly wheather review*, 86(4) : 117-122.
- Tusting, L. S., Bisanzio, D., Alabaster, G., et al. (2021). The evidence for improving housing to reduce malaria : A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11, 123. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92924-3>
- Twisa S., Kazumba S., Kurian M. & Buchroithner M.F. (2020). Evaluating and Predicting the Effects of Land Use Changes on Hydrology in Wami River Basin, Tanzania. *Hydrology*, 7(1) : 17.
- Van Loon H. & Shea D.J. (1985). The Southern Oscillation. Part IV : The precursors south of 15 S to the extremes of the oscillation. *Monthly Weather Review*, 113(12) : 2063–2074.
- Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J-M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity, Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 447–457.
- Violaine L. & Maxime A. (2022). Les scénarios SSP : Décryptage et Recommandations D’utilisation pour une Démarche d’adaptation au Changement climatique, Paris, France, 16 p.
- Wackernagel H. (1993). Cours de géostatistique multivariable. Paris, France, 87 p.
- Watterson I.G. & Dix M.R. (2003). Simulated changes due to global warming in daily precipitation means and extremes and their interpretation using the gamma distribution. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 108(13) : 1-20.
- Wilhite D.A. & Glantz M.H. (1985). Understanding : the drought phenomenon : the role of definitions. *Water international*, 10(3) : 111-120.
- Willkofer F., Schmid F.-J., Komischke H., Korck J., Braun M. & Ludwig R. (2018). The impact of bias correcting regional climate model results on hydrological indicators for Bavarian catchments. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 19(2) : 25-41.
- Yan B., Fang N.F., Zhang P.C. & Shi Z.H. (2013). Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, 484: 26–37.

-
- Yang D., Herath, S. et Musiake K. (2000). Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. *Hydrological Processes*, 14 (3), pp. 403-416.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nanguy Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 225 p.
- Yao A.B., Goula Bi Tié A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kane A. & Sambou S. (2012). Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. (19) : 136–157.
- Yao A.B., Kouassi L.K., Kouakou K.E., Goula B.T.A. & Gaye A.T. (2019). Evaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 15(4) : 330–342.
- Yéo W.E. (2017). Effects of Climate Change and Human Activities on Water Resources in the Comoe River Basin (West Africa). Thèse de Doctorat, WASCAL (Abidjan, Côte d'Ivoire), 167 p.
- Zhang T. (2004). Solving large scale linear prediction problems using stochastic gradient descent algorithms. *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, 3(18) : 116-176
- Zhang X. & Yang F. (2017). RClimDex (1.1) User Guide : Indices for climate extremes calculation. ETCCDI / Climate Research Division. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
[ETCCDI](http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml)
- Zhang Z., Li J., Zhu P., Zhao H. & Liu G. (2018). Modeling multi-turn conversation with deep utterance aggregation. *Association for Computational Linguistics*, 27(4) : 3740–3752.

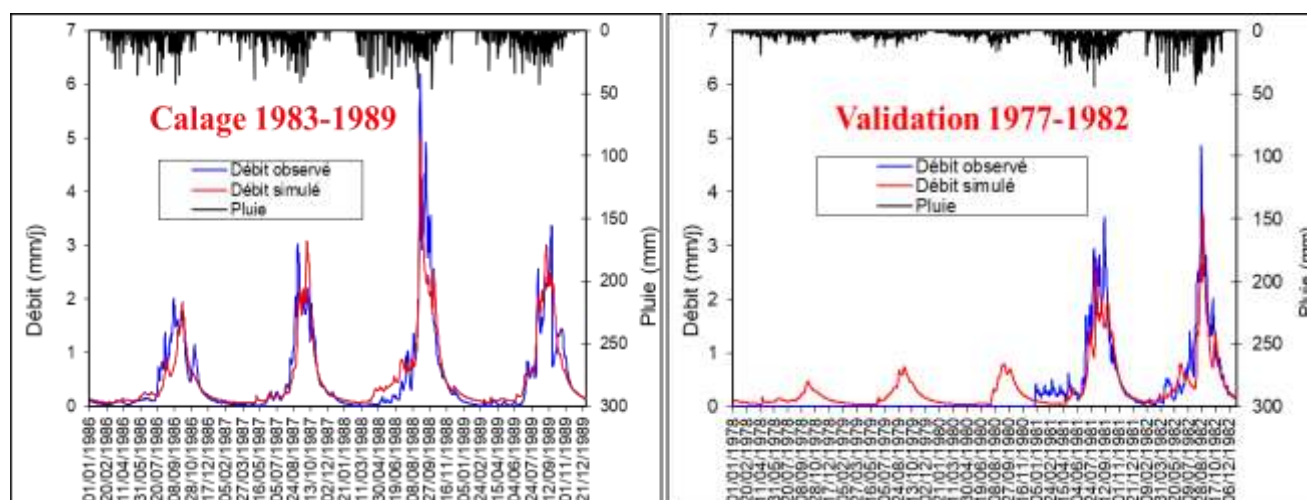
ANNEXES



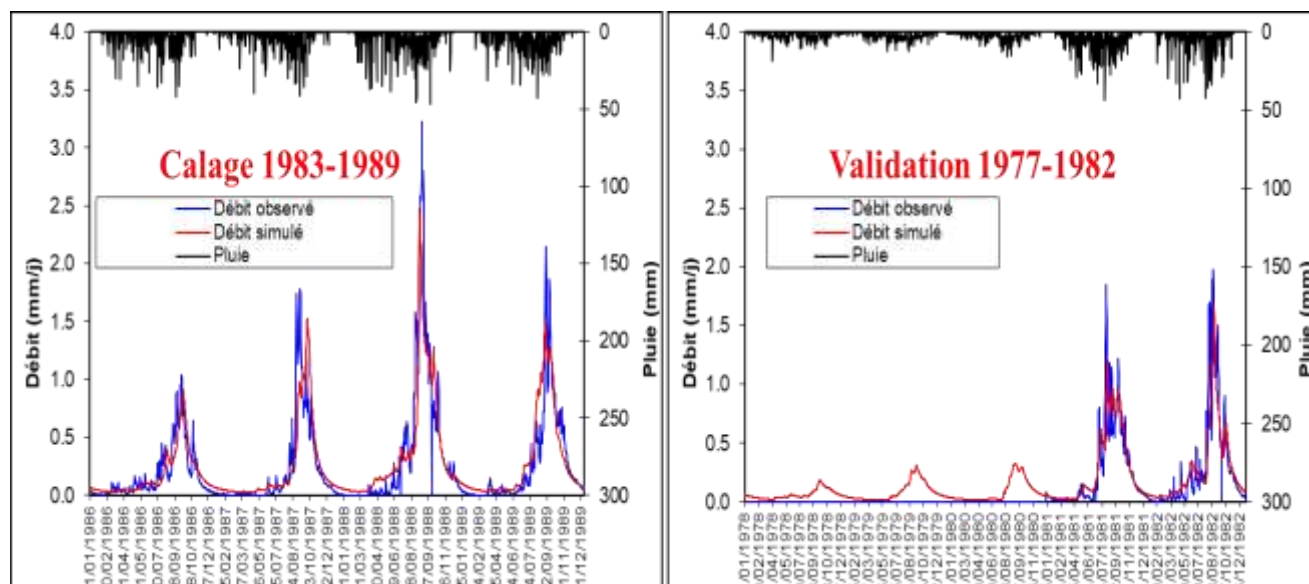
Annexe 1 : Évolution des températures mensuelles de 1971 à 2020



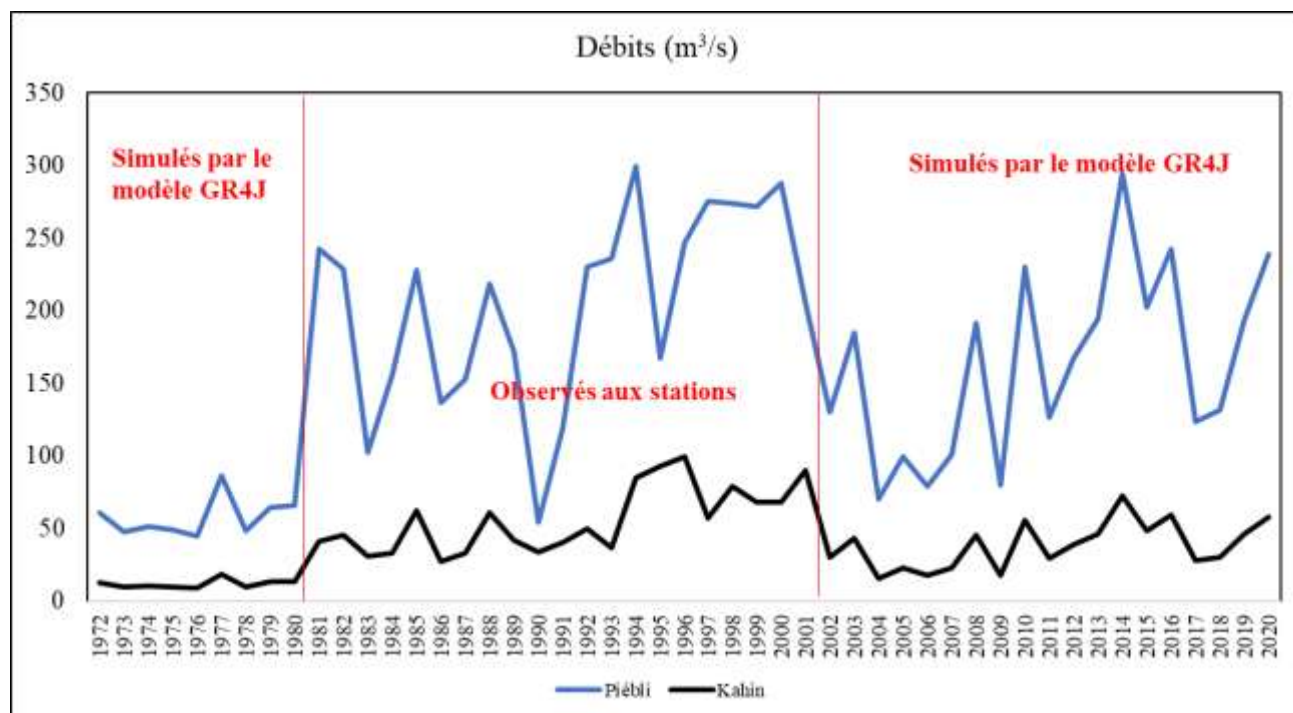
Annexe 2 : Évolution des températures annuelles de 1971 à 2020



Annexe 3 : Histogrammes en calage et validation du modèle GR4J à Piébli



Annexe 4 : Histogrammes en calage et validation du modèle GR4J à Kahin



Annexe 5 : Évolution des débits moyens annuels sur la période 1972-2020 aux stations hydrométriques de Piébli et Kahin

Modèles	Odiénné			Daloa			Man		
	RMSE	R	AAE	RMSE	R	AAE	RMSE	R	AAE
ICHEC	1,1	0,97	0,75	0,75	0,98	0,75	1,3	0,97	0,49
IPSL	1,1	0,99	0,25	1,99	0,95	1,2	1,7	0,97	0,5
MIROC	0,9	0,96	0,8	0,99	0,94	0,8	1	0,81	0,75
MOHC	1,1	0,97	0,75	1,5	0,95	1	1,5	0,91	0,7
MPI	1,2	0,96	0,85	2,5	0,85	1,7	1,59	0,92	1,75
NCC	1,1	0,96	0,95	2,1	0,97	1,2	1,75	0,97	0,5
NOAA	1,4	0,98	0,25	2,5	0,9	1,9	1,5	0,93	0,75
CCCMA	0,9	0,96	0,8	1,8	0,93	1	0,65	0,93	0,69
CSIRO	0,75	0,92	0,75	0,8	0,86	1,49	0,79	0,89	1,29
CNRM	1,1	0,98	0,25	1,9	0,97	1	1,79	0,97	0,9

Annexe 6 : Valeurs des paramètres statistiques du diagramme de Taylor des précipitations moyennes mensuelles

Modèles	Odiénné			Daloa			Man		
	RMSE	R	AAE	RMSE	R	AAE	RMSE	R	AAE
ICHEC	0,7	0,9	1,1	0,99	0,81	1,2	0,75	0,75	0,75
IPSL	0,75	0,96	0,25	1,49	0,9	0,65	1,09	0,8	0,75
MIROC	0,7	0,8	0,7	1,1	0,85	0,65	0,85	0,59	0,85
MOHC	0,75	0,91	0,4	1,25	0,97	0,7	0,95	0,7	0,7
MPI	1	0,97	0,3	2,5	0,9	1	1,48	0,78	1,25
NCC	0,8	0,95	0,3	1,49	0,96	0,65	1,75	0,97	0,5
NOAA	0,6	0,85	0,6	1,25	0,8	0,75	0,8	0,6	0,8
CCCMA	0,75	0,92	0,75	1,79	0,89	0,6	1	0,75	0,75
CSIRO	0,5	0,7	0,75	1,4	0,4	1,4	0,65	0,5	1,3
CNRM	0,75	0,9	0,4	1,2	0,92	0,4	0,8	0,8	0,75

Annexe 7 : Valeurs des paramètres statistiques du diagramme de Taylor des températures moyennes mensuelles

PUBLICATIONS

Évaluation de la performance des modèles climatiques régionaux du programme CORDEX-AFRIQUE sur le bassin versant du fleuveassandra à Buyo (Ouest de la Côte d'Ivoire)

[Evaluation of the performance of climate models from the CORDEX-AFRICA database on the watershed of the Sassandra River in Buyo (Western Côte d'Ivoire)]

DAOUDA Konaté¹, KOUADIO Zilé Alex¹, COULIBALY Zana Mohamed¹, and DJE Kouakou Bernard¹⁻²

¹Geoscience et environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

²Société d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Maritime (SODEXAM), Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Global and regional climate simulation results often do not accurately reflect changes in climate, hampering their direct applicability. Impact studies using high-resolution data received bias correction for climate variables. This study made it possible to choose and validate regional climate models from the CORDEX-Africa database in order to describe the future climate of the Sassandra River watershed in Buyo (western Côte d'Ivoire). The choice of models was made by the Taylor diagram method associated with the seasonal profile of the models and observations. Thus, the outputs of the selected models were corrected by the Distribution Mapping method (quantile mapping) using the CMhyd tool. At the end the potential future climate changes are assessed by analyzing the changes predicted by the models. The study reveals that the ICHEC, IPSL and NCC models have a good ability to simulate the climate of the basin. The climate simulation shows variations in climate parameters. The RCP 4.5 scenario forecasts rainfall fluctuations of -20.8% to +58.1% by 2030 and from -18.8% to +61.7% by 2050. The RCP 8.5 predict precipitation fluctuations of -19.4% to +43.8% by 2030 and -7.5% to +73.3% by 2050. All models include an increase in temperature under the two scenarios from +1.6 to +4.4°C for RCP 4.5 and from +2.1 to +5°C for RCP 8.5.

KEYWORDS: Climate model, CORDEX-Africa, Climate simulation, Sassandra watershed, Ivory Coast.

RESUME: Les résultats de la simulation du climat mondial et régional ne décrivent souvent pas bien les changements du climat, ce qui entrave leur applicabilité directe. Les études d'impact utilisant des données à grande résolution nécessitent une correction des biais des variables climatiques. Cette étude a permis de choisir et valider des modèles climatiques régionaux depuis la base de données CORDEX-Afrique afin de décrire le climat futur du bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo (Ouest de la Côte d'Ivoire). Le choix des modèles a été fait par la méthode du diagramme de Taylor associé au profil saisonnier des modèles et des observations. Ainsi, les sorties des modèles retenus ont été corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) à l'aide de l'outil CMhyd. À la fin les changements potentiels du climat futur sont évalués par l'analyse des changements prédites par les modèles. L'étude révèle que les modèles ICHEC, IPSL et NCC ont une bonne aptitude à simuler le climat du bassin. La simulation du climat montre des variations des paramètres climatiques. Le scénario RCP 4.5, prévoit des fluctuations de la pluviométrie de -20,8% à +58,1% à l'horizon 2030 et de -18,8% à +61,7% à l'horizon 2050. Le RCP 8.5 prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4% à +43,8% à l'horizon 2030 et de -7,5% à +73,3% à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1.6 à +4,4°C pour le RCP 4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP 8.5.

MOTS-CLEFS: Modèle climatique, CORDEX-Afrique, Simulation climatique, Bassin versant Sassandra, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Depuis des décennies les questions de changement et de variabilité climatiques sont placées au centre des préoccupations scientifiques, en raison de leurs impacts immédiats et durables sur le milieu naturel et sur l'homme [1]. Les recherches effectuées ont pu mettre en évidence les sources des changements du climat. Les impacts du changement climatique sont rependus et sont principalement la résultante d'activités naturelles et anthropiques interdépendantes qui influencent les phénomènes naturels dans l'atmosphère et l'écologie océanique, présentant des conséquences diverses sur les conditions climatiques et leur répartition dans le monde [2]. Le climat global étant conditionné par de nombreux facteurs tels que la surface terrestre, les calottes glaciaires polaires et le soleil, entre autres, la création de bases de données exploitables permettant la simulation des conditions complexes du climat constitue une priorité [3]. De ce fait, les modèles climatiques jouent un rôle important dans les études sur le changement global.

Cependant, de nombreuses difficultés sont rencontrées par les modèles climatiques à simuler le climat à une résolution plus fine pour les applications locales [4]. Selon [5], la réduction d'échelle est une alternative pour évaluer la variabilité du climat au niveau local. Les recherches de [6] montrent que les sorties des modèles climatiques globaux présentent une résolution spatiale grossière qui entrave la capacité à les utiliser dans leur état brut. Par conséquent, la réduction d'échelle devient très importante dans la mesure où ces données atmosphériques et météorologiques pourraient être exploitées dans un format plus fin capable d'améliorer la qualité des simulations hydrologiques [3]. Malheureusement, très peu d'études de réduction d'échelle et de correction des biais sur le continent Africain existent malgré sa forte vulnérabilité au changement climatique mondial en raison de sa faible capacité d'adaptation et de sa résilience [7]. Également, peu d'informations relatives aux effets du changement climatique sur les ressources en eau dans les pays d'Afrique subsaharienne existent [8], bien qu'il y ait une augmentation significative des recherches sur la modélisation du changement climatique ces dernières années [9]. Les précédentes études sur le bassin ont concerné l'évaluation de la variabilité hydro climatique sur le bassin [10], l'impact des changements climatiques sur le bassin [11], mais très peu d'études sur la correction de biais [12]. La situation géographique du bassin versant de Sassandra lui confère une position stratégique et importante dans l'économie de la Côte d'Ivoire car disposant de deux barrages de production de l'énergie hydroélectrique. C'est une zone de transition entre différents climats, traduisant ainsi une variabilité des précipitations (intensité et nombre de jour). Aussi, les questions relatives à la disponibilité et à la gestion de l'eau sont d'une importance capitale. La réponse à ces questions réside dans les mesures d'adaptation à prendre dans les décennies à venir pour faire face aux conséquences des changements climatiques. Il est dès lors, primordial pour les décideurs et gestionnaires de quantifier le devenir de la ressource en eau et de sa variabilité temporelle et spatiale. À cet effet, l'utilisation de modèles climatiques régionaux développés par les grands centres de recherche climatologiques serait nécessaire. Malheureusement, il existe beaucoup de contraintes quant au choix et la validation des modèles climatiques dans une zone quelconque. Ce travail se propose d'analyser les performances des modèles climatiques régionaux et de valider les plus performantes en utilisant la base de données du programme CORDEX-Afrique sur le bassin versant du fleuve Sassandra dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée (Figure 1) sous le nom de Feroudougouba. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 75 000 km² à la mer [13]. La portion guinéenne du bassin a une superficie d'environ 8 000 km². La partie ivoirienne du bassin versant ayant pour exutoire le barrage hydroélectrique de Buyo a une superficie de 39 980 km². Elle est comprise entre les longitudes Ouest de coordonnées 6°50' et 8°20' et les latitudes Nord de coordonnées 6°15' et 9°50'.

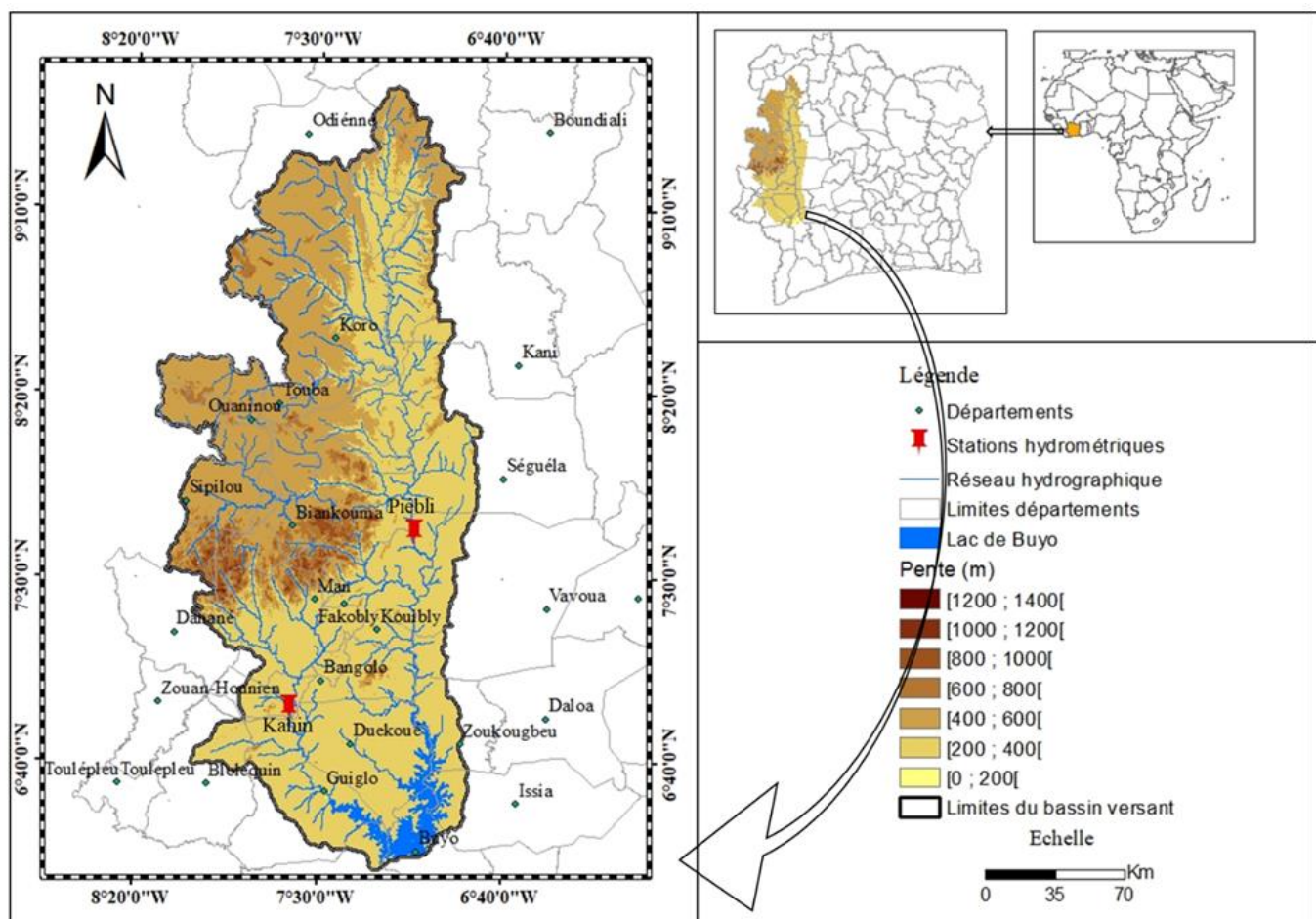


Fig. 1. Bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo

Le bassin est parcouru par trois régimes climatiques (Figure 2): le climat tropical de transition atténué (I), le climat de montagne (II) et le climat équatorial de transition atténué (III). La température moyenne annuelle dans le sud du bassin de Sassandra est de 25° C, alors que dans le nord, elle est de 26°C. Les sols du bassin versant sont généralement accompagnés par le complexe de sols podzoliques rattachés à la basse Côte d'Ivoire [14]. L'ensemble du bassin est sur le socle ancien (formation du précambrien inférieur et moyen) et dispose de quelques pointements de dolérites et de basaltes datés du primaire [15]. Le relief du bassin est monotone résultant essentiellement de l'érosion des chaînes montagneuses ayant évoluées en pénéplaine. Les altitudes diminuent de manière graduelle de 500 m au nord à moins de 50 m au Sud [11]. La végétation du bassin peut être subdivisée en deux domaines caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes: le domaine soudanais et le domaine guinéen. Le domaine soudanais comprend des formations forestières et savaniques juxtaposés dans la haute Côte d'Ivoire. Du sud vers le nord, le domaine guinéen est couvert de savanes de basse côte, de forêt ombrophile, de forêt mésophile et de forêt montagnard [16]. Sur l'ensemble du bassin, au total douze barrages ayant différents usages ont été construits. Avant la mise en service du barrage hydro-électrique de Buyo en 1981, 74 % de la superficie de l'espace Buyo étaient couverts de forêts denses dont moins de 25 % étaient à peine effleurés par les activités humaines. Aujourd'hui, la forêt de la région de Buyo a perdu 90 % de ses ressources végétales et animales après la mise à l'eau du barrage hydro-électrique de Buyo.

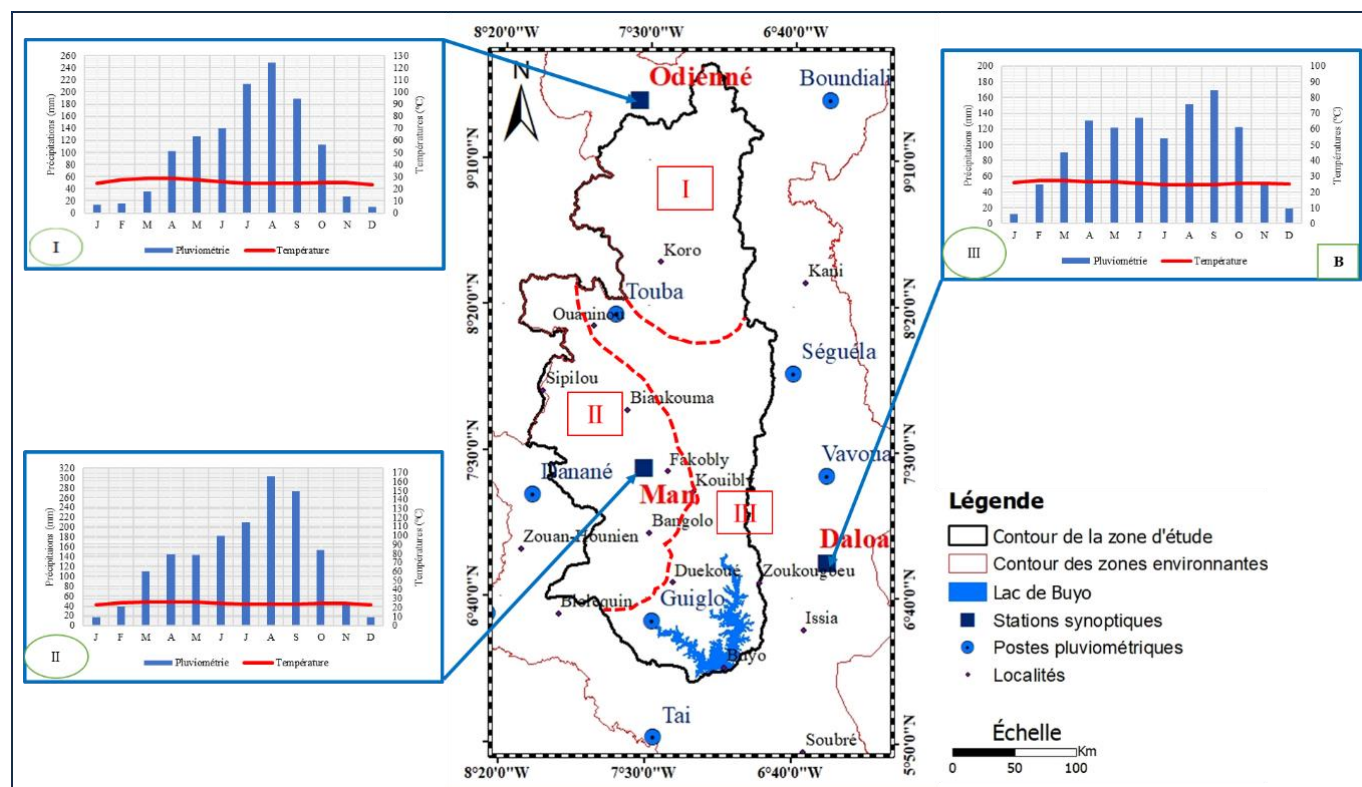


Fig. 2. Carte des zones climatiques du bassin versant du Sassandra à Buyo

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

Le matériel utilisé se compose de logiciels, de données climatiques observées et de sorties de modèles climatiques régionaux au pas de temps journalier.

Les données observées de précipitations et de températures maximales et minimales, disponibles sur la période 1971-2020 proviennent des stations de Daloa, Man et Odienné acquises auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Les données de sortie de modèles régionaux utilisées couvrent la période 1981-2005 et proviennent de la plateforme CORDEX. Le tableau I décrit les modèles et leurs pays d'appartenance.

Comme logiciel, l'outil CMHyd (Climat Model data for Hydrological modelling), est utilisé pour l'extraction et la correction des sorties de modèles climatiques.

Tableau 1. Caractéristiques des modèles CORDEX-Afrique utilisés

Modèles	Institut	Pays
RCA4 (CCCma-CanAM4)	CCCma	Canada
RCA4 (CNRM-CM5)	CNRM	Français
RCA4 (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-QCCCE	USA
RCA4 (ICHEC-EC-EARTH)	ICHEC	Irlande
RCA4 (IPSL-IPSL-CM5A-MR)	IPSL	Français
RCA4 (MIROC-MIROC5)	MIROC	Japon
RCA4 (MOHC-HadGEM2-ES)	MOHC	Brésil
RCA4 (MPI-M-MPI-ESM-LR)	MPI-M	Allemagne
RCA4 (NCC-NorESM1-M)	NCC	Norvège
RCA4 (NOAA-GFDL-ESM2M)	NOAA-GFDL	USA

3.2 MÉTHODES

3.2.1 CHOIX DES MODÈLES CLIMATIQUES

DIAGRAMME DE TAYLOR

L'étape initiale de l'utilisation des modèles climatiques pour l'évaluation des impacts du changement climatique est de vérifier leur aptitude à reproduire le climat de la zone d'étude [17]. À cet effet, le diagramme de Taylor est utilisé. C'est un digramme bidimensionnel qui permet de déterminer le lien entre les données observées et simulées à partir de trois paramètres statistiques: la corrélation (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type. Le digramme de Taylor fournit un résumé statistique concis des relations entre les données simulées par les modèles et celles observées en termes de:

- Leur corrélation (R) qui permet de déterminer le pouvoir de prédiction des modèles en comparant les valeurs prédites et celles observées;

$$R = \frac{Cov(O_i, S_i)}{\delta O_i \times \delta S_i} \quad (1)$$

Avec Cov (,): covariance des valeurs observées et simulées;

δO_i et δS_i : écarts types des valeurs observées et simulées.

- Leur Root Mean Square Error (RMSE). Le RMSE permet de quantifier la différence entre la simulation et l'observation;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Avec S_i et O_i correspondant respectivement aux valeurs simulées et observées de la variable;

N désigne le nombre de couple de données à comparer.

- Et de leur erreur absolue moyen ou AAE (Average Absolut Error);

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{N} \quad (3)$$

Avec S_i et O_i désignant respectivement les valeurs simulées et observées de la variable;

N désigne le nombre de couple de données à comparer.

Les résultats des simulations sont considérés comme fiables lorsque le R est proche de 1, le RMSE et l'AAE ayant des valeurs faibles (avoisinante zéro). En d'autres termes, plus R est élevé, RMSE et le rapport des écarts types entre le modèle et l'observation sont faibles, plus le modèle reproduit mieux le régime saisonnier du paramètre climatique.

COMPARAISON DES RÉGIMES SAISONNIERS DE TEMPÉRATURES ET DE PRÉCIPITATIONS OBSERVÉS ET CEUX DES SORTIES DES MODÈLES

Le régime saisonnier de la température moyenne et des précipitations est représenté sur la période 1981-2005. Pour chaque paramètre, le même graphique est représenté portant sur le régime saisonnier des 10 modèles climatiques régionaux et celui de l'observation dans l'optique de choisir celui qui reproduit au mieux la variabilité saisonnière de l'observation.

3.2.2 CORRECTION DES SORTIES DE MODÈLES

Les données de sortie de modèle climatique sont généralement biaisées. Ainsi, avant de les utiliser, elles sont corrigées. Ces données ont été corrigées à l'aide de l'outil CMhyd. Cet outil dispose de huit méthodes de correction de biais différentes, notamment la méthode du linear scaling (multiplicative and additive), la méthode du delta change correction (multiplicative and additive), la méthode du precipitation local intensity scaling, la méthode du power transformation of precipitation, la méthode du variance scaling of temperature, et la méthode du distribution mapping of precipitation and temperature.

Pour cette étude, la méthode de distribution mapping of precipitation and temperature a été utilisée. [18] ont noté la cartographie de distribution comme étant la plus performante après avoir utilisé cinq méthodes de correction des biais. Cette méthode de correction de biais corrige la fonction de distribution des valeurs simulées pour se conformer à la fonction de distribution observée [19]. L'occurrence de la distribution des précipitations et de la température a été décalée à l'aide de la fonction de transfert des données simulées de la MCR basé sur la valeur moyenne mensuelle [18]. Pour les événements de précipitations, la distribution Gamma développée par [20] avec des paramètres de forme de " α " et " β " ont été retenus comme étant plus appropriés. La distribution Gamma a été utilisée dans plusieurs études [21] et s'est avéré plus adapté aux études d'analyse des précipitations. Le modèle peut être représenté mathématiquement par:

$$f_Y(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}}; \quad (4)$$

où Γ est la fonction Gamma; et α et β sont respectivement les paramètres de forme et d'échelle. La distribution gaussienne avec le paramètre " μ " et paramètre d'échelle " σ " s'est avéré être le meilleur ajustement pour les événements de température. Ceci a été confirmé par plusieurs études en utilisant la distribution [22].

3.2.3 ESTIMATION DES CHANGEMENTS FUTURS

Pour mieux comprendre les changements futurs du climat, la quantification des variations futures du cumul annuel des précipitations et des températures moyennes annuelles a été faite au niveau de chaque station et cela pour les deux scénarii de changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les déviations du cumul annuel des précipitations ont été standardisées par rapport à la moyenne de la période de contrôle (1981-2005) et sont exprimées en pourcentage pour la pluviométrie et en degrés Celsius pour la température. La formule appliquée est la suivante:

Pour la pluviométrie:

$$\text{Déviation}_i = \frac{\text{Cum}_i - \text{Cum}_{\text{CTRL}}}{\text{Cum}_{\text{CTRL}}} * 100 \quad (5)$$

Avec Cum_i : cumul annuel des précipitations de l'année i ;

Cum_{CTRL} : cumul annuel moyen des précipitations sur la période de contrôle (1981-2005).

Pour les températures moyennes annuelles, la formule suivante a été appliquée:

$$\text{Déviation}_i = T_{\text{moy } i} - T_{\text{moy CTRL}} \quad (6)$$

Avec $T_{\text{moy } i}$: température moyenne annuelle de l'année i ;

Ces déviations représentent la diminution ou l'augmentation relative des précipitations ou des températures annuelles pour le futur (horizon 2030 et 2050) comparées à la période de référence 1981-2005.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS

4.1.1 CHOIX DES MODÈLES

• Diagramme de Taylor

La comparaison statistique de la distribution intra-saisonnière du cumul des précipitations simulées par les modèles aux observations à la station d'Odienné montre une très grande variabilité (Figure 3). Néanmoins, les modèles climatiques IPSL et NCC ont montré une corrélation (R) d'au moins de 0,98 avec les observations et un écart type de 1,1. Au niveau de la station de Daloa les modèles climatiques ICHEC et NCC ont une corrélation (R) supérieure à 0,96 avec les précipitations observées et une erreur absolue de simulation de moins de 1,2 par rapport aux observations. Pour la station de Man, les modèles climatiques IPSL et NCC ont montré les meilleures performances à simuler les précipitations. Le coefficient de corrélation est égal à 0,96. Les deux modèles présentent une erreur absolue de simulation de moins de 0,5 par rapport aux précipitations observées.

Concernant les températures (Figure 4), à Odiénné, tous les 10 modèles sont assez bien corrélés avec les observations ($0,7 \leq R \leq 0,99$). Les modèles NCC, et ICHEC ont montré les plus fortes corrélations avec les températures observées avec $R > 0,97$. De plus, ces MCRs présentent un écart type compris entre 0,7 à 0,85 par rapport aux observations. En outre, pour les températures à Daloa, les 10 modèles sont assez bien corrélés aux observations avec R supérieure à 0,79 néanmoins, une forte déviation est observée par rapport aux observations (écart type $\geq 0,89$). À la station de Man, les modèles ne sont assez bien corrélés avec les températures observées ($0,1 \leq R \leq 0,85$) mais présentent un bon écart type entre les températures simulées et observées. On note un écart-type compris entre 0,5 et 1,2

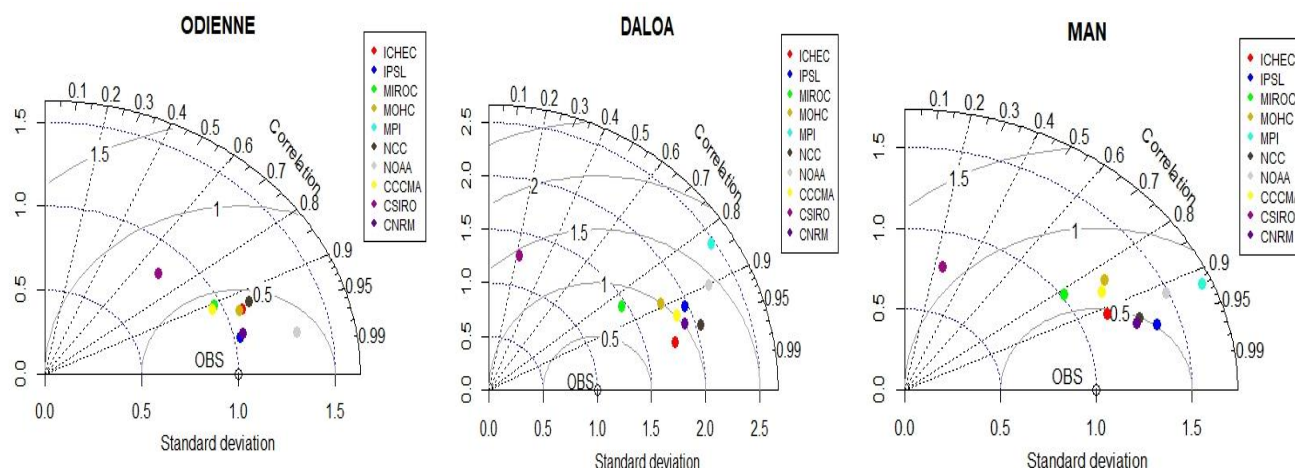


Fig. 3. Diagramme de Taylor des séries mensuelles de la pluviométrie

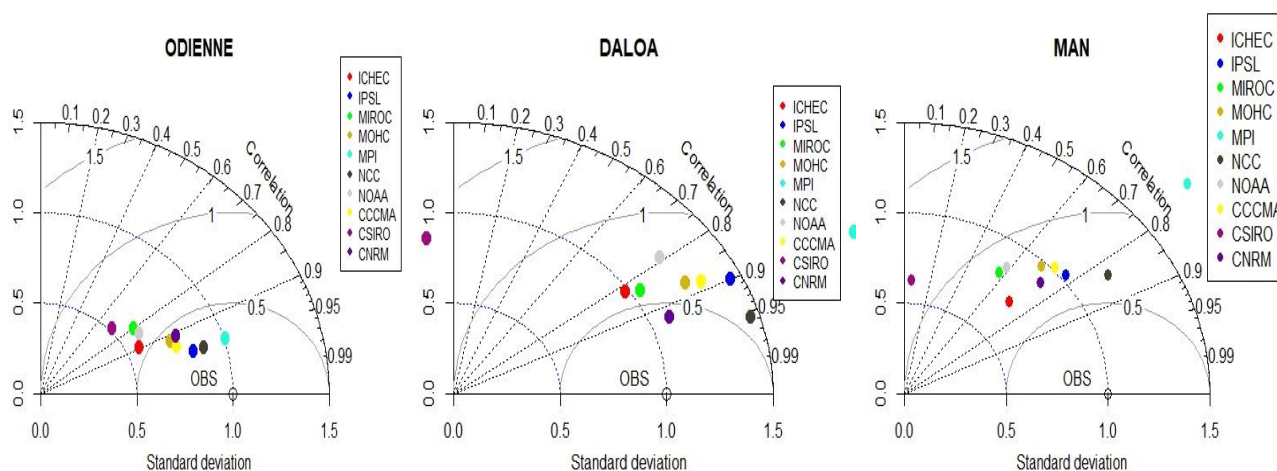


Fig. 4. Diagramme de Taylor des séries mensuelles des températures

• Cycle saisonnier des précipitations et des températures

L'étude du cycle saisonnier des précipitations (Figures 5) montre que le régime pluviométrique est mieux représenté à Odiénné et à Man par les modèles NCC, IPSL, même s'ils surestiment les précipitations. Les modèles NCC et ICHEC représentent mieux la pluviométrie de Daloa.

La figure 6 indique que tous les modèles reproduisent assez bien le régime saisonnier de la température dans les stations du bassin versant comparés à l'observation.

De l'analyse de cette figure, il est constaté que les modèles simulent bien la tendance des observations même s'il y a des biais. Seuls les modèles IPSL et NCC s'approchent le plus des températures moyennes mensuelles observées à Odiénné et à Man. Par ailleurs, à Daloa se sont les modèles ICHEC et NCC qui simulent bien le cycle saisonnier.

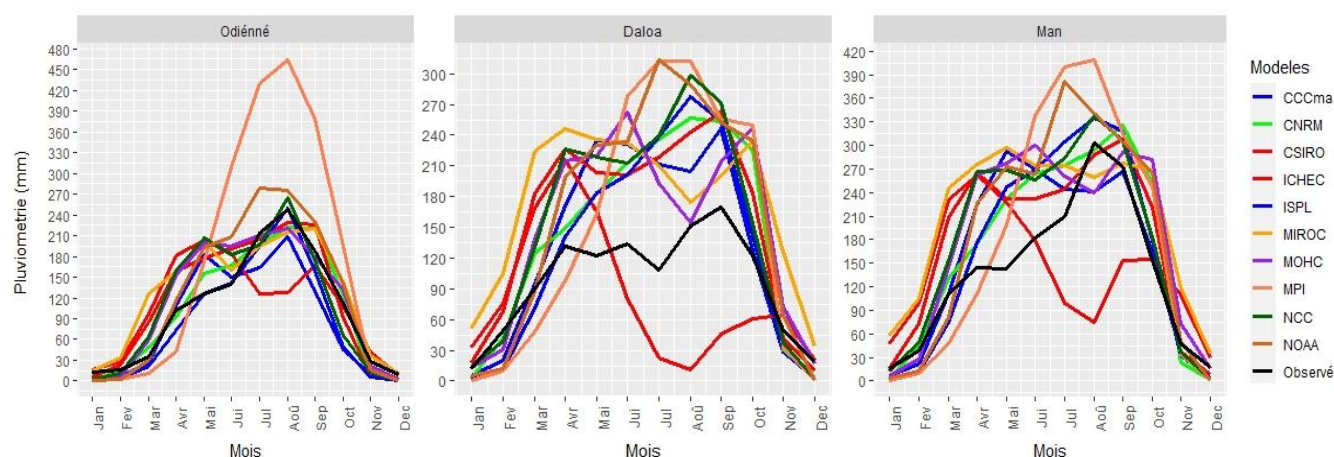


Fig. 5. Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles des 10 RCMs

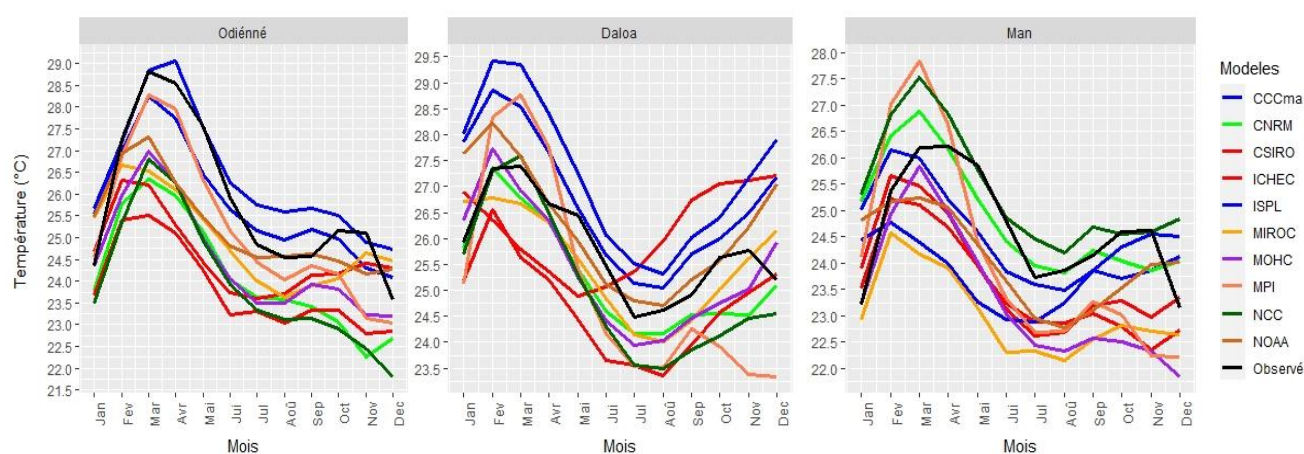


Fig. 6. Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles des 10 RCMs

4.1.2 PARAMÉTRAGE DES MODÈLES

Une fois les modèles choisis, il est procédé au calcul des déviations entre les paramètres de la période de contrôle (1981-2005) et les paramètres simulés du futur pour les deux scénarii. Cette déviation exprimée permet d'apprécier l'évolution de la température et de la pluie dans le futur par rapport à la période de contrôle.

• Précipitations

Au niveau des précipitations, le régime saisonnier (Figures 7) confirme que les modèles IPSL et NCC reproduisent mieux le climat d'Odienné et de Man même si des biais des précipitations sont observés au niveau de ces modèles. À Daloa, les modèles ICHEC et NCC reproduisent mieux le cycle saisonnier de pluie. Il faut tout de même remarquer des écarts (surestimation).

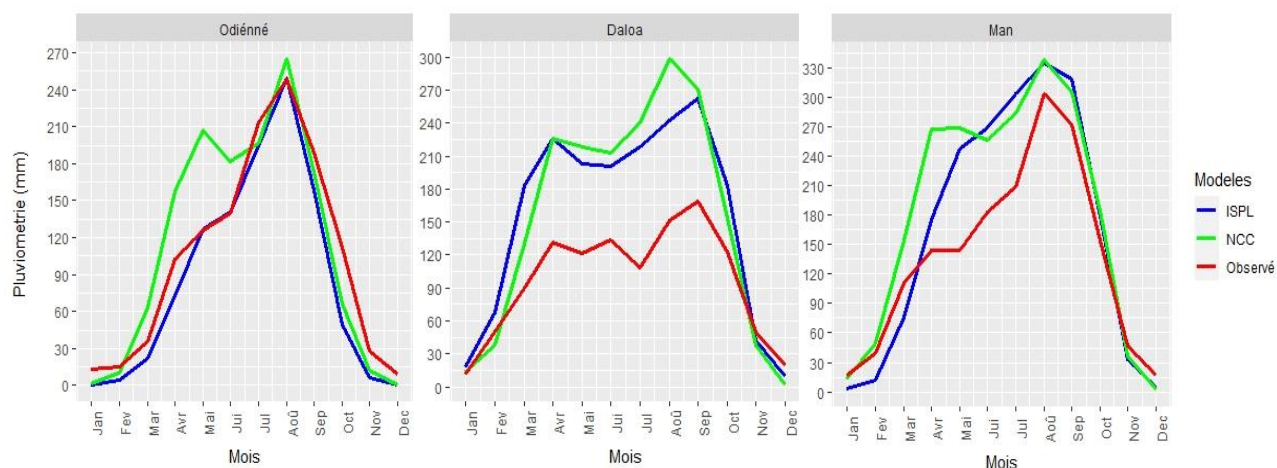


Fig. 7. Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles des modèles retenus et de l'observée

• Températures

Au niveau des températures (Figure 8), les deux modèles détectent bien les pics au cours de l'année, mais sont décalés d'un mois par rapport à l'observation au niveau de chaque station et avec tous les modèles.

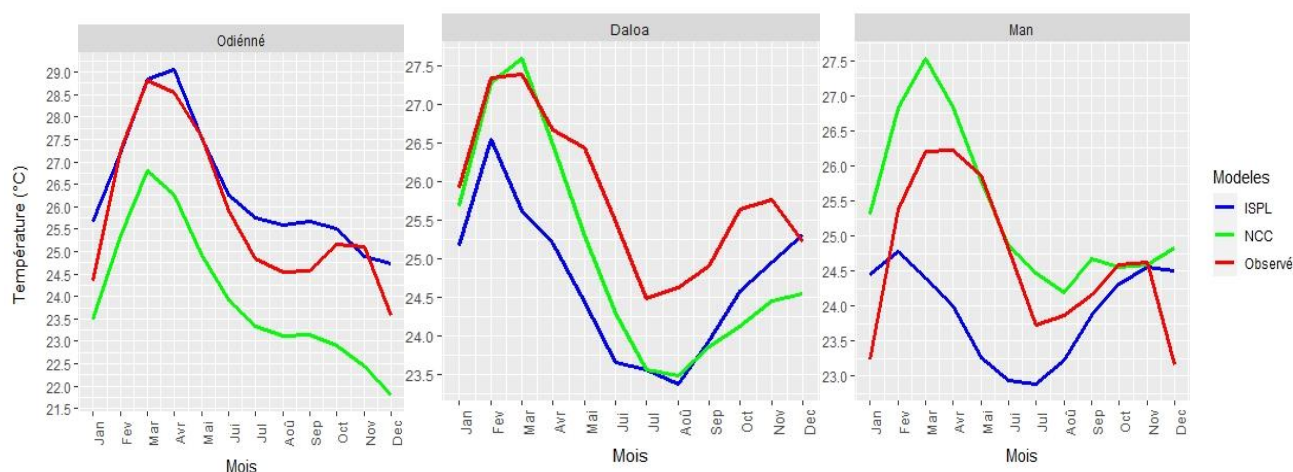


Fig. 8. Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles des modèles retenus et de l'observée

L'analyse croisée du cycle saisonnier et du diagramme de Taylor des différents paramètres a permis de retenir les modèles contenus dans le tableau II.

Tableau 2. MCRs choisis au niveau de chaque zone climatique

Stations	MCRs Choisis	Types de stations
Daloa	ICHEC, NCC	Synoptique
Man	IPSL, NCC	Synoptique
Odiénné	IPSL, NCC	Synoptique

4.1.3 CORRECTION DES SORTIES DES MODÈLES CLIMATIQUES

Les figures 9 et 10 ont montré qu'après l'application de la correction du biais par la méthode de distribution mapping of precipitation and temperature, les écarts dans les modèles ont été efficacement atténués. La correction du biais de

cartographie de distribution a pu améliorer de manière significative les sorties des pluies, des températures maximales et minimales. Cependant, de légers écarts dans les données entre valeurs corrigées et observées sont apercevables.

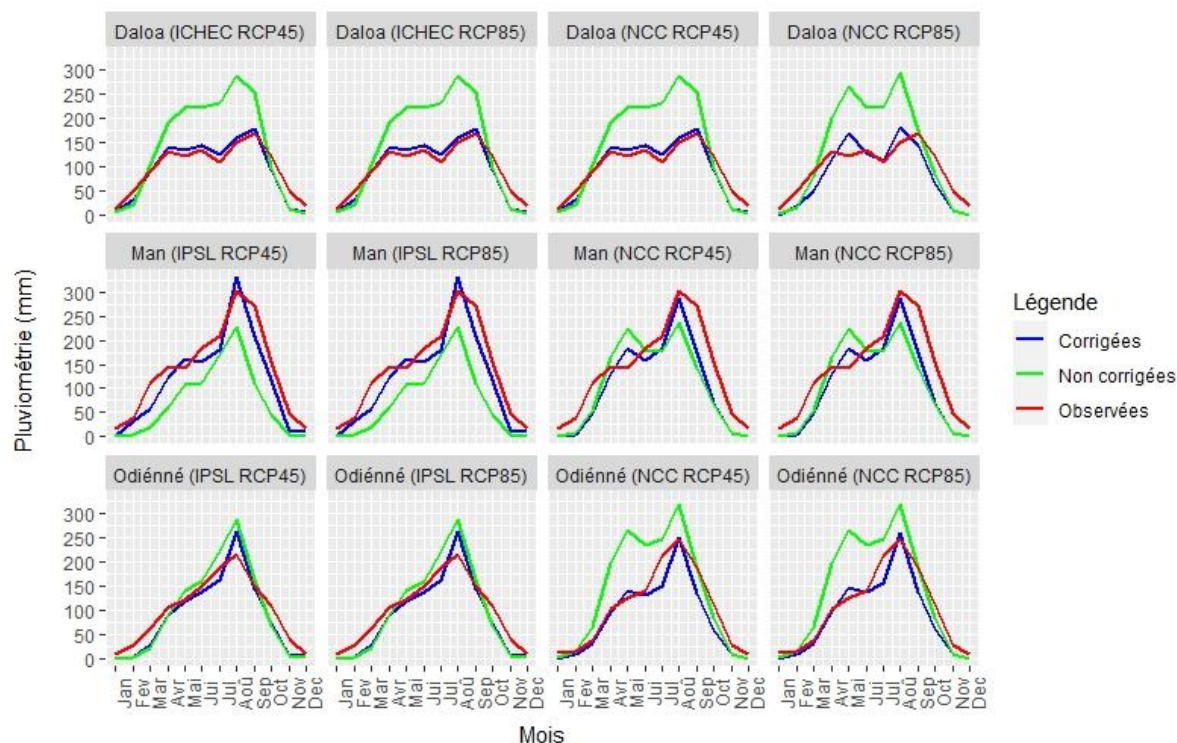


Fig. 9. Sorties de pluie corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping)

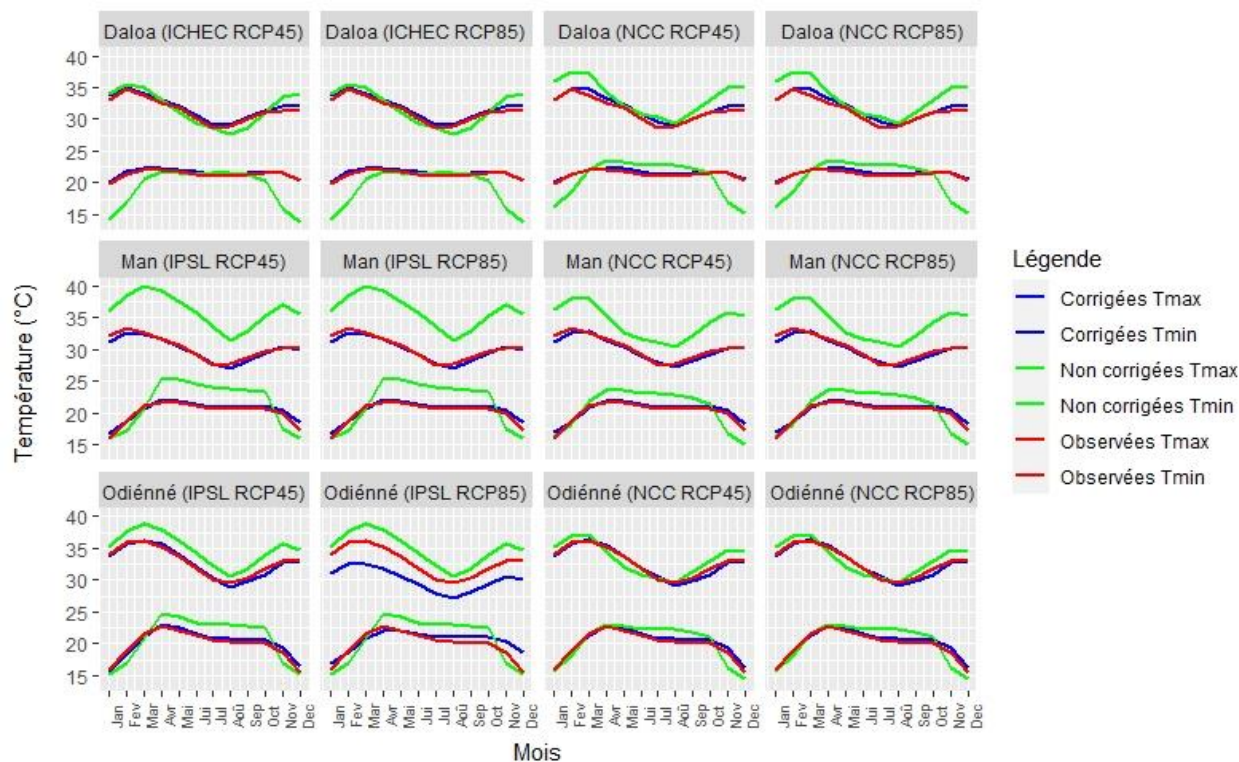


Fig. 10. Sorties des températures corrigées par la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping)

4.1.4 ANALYSE DES CHANGEMENTS FUTURS

4.1.4.1 SELON LE SCÉNARIO RCP 4.5

■ Précipitations (Figure 11)

À la station de Daloa, les modèles ICHEC prévoit une baisse de 2,4%, par contre, me modèle NCC prévoit une hausse de 4,2% à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 4.6% pour le modèle ICHEC et de 12% pour le modèle NCC.

À la station de Man, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des baisses de 20,8% et de 11% à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des baisses de 18,8% et de 11,4%.

À la station de Odiénné, le modèle IPSL prévoient une hausse de 40,5% alors que le modèle NCC prévoit une hausse de 59,1% à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, c'est une hausse de 36,3% qui sera observée par le modèle IPSL et une hausse de 61,7% par le modèle NCC.

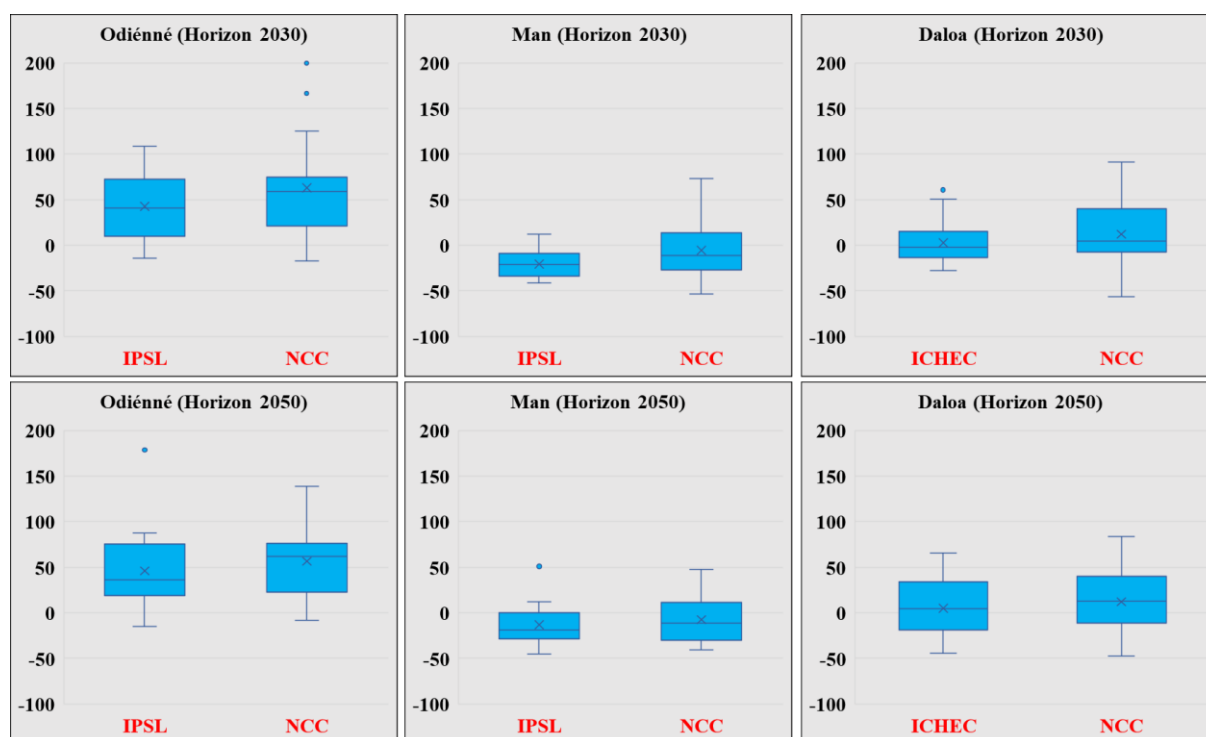


Fig. 11. Variation du cumul annuel des précipitations

■ Températures (Figure 12)

À la station de Daloa, les modèles ICHEC et NCC prévoient respectivement des hausses de 3°C et de 3,7°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 3,7°C et de 4,4°C.

À la station de Man, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des hausses de 1,6°C et de 3,1°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 2,3°C et de 3,6°C.

À la station de Odiénné, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des hausses de 2°C et de 2,7°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 2,6°C et de 3,2°C.

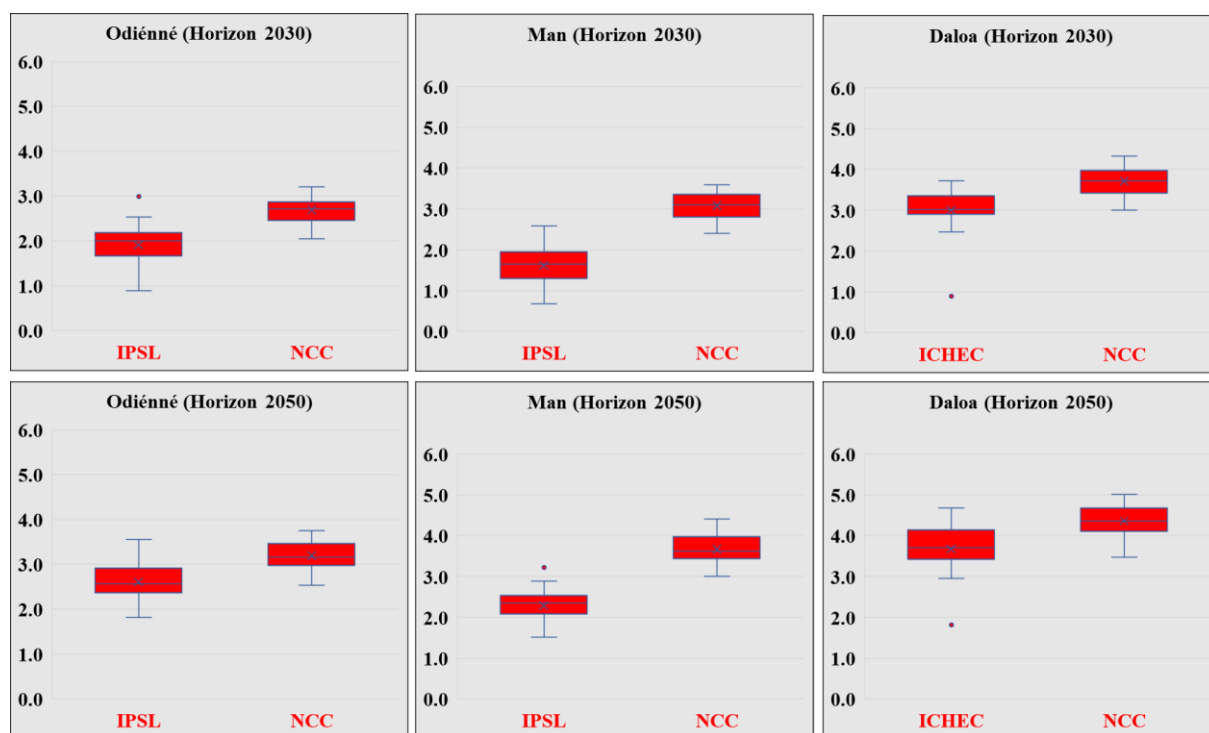


Fig. 12. Variation des températures moyennes annuelles

4.1.4.2 SELON LE SCÉNARIO RCP 8.5

■ Précipitations (Figure 13)

À la station de Daloa, tous les deux modèles sont unanimes sur les hausses de précipitations. Les deux modèles ICHEC et NCC prévoient respectivement des hausses de 4,2% et de 1,4% à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 17,2% et de 36,9%.

À la station de Man, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des baisses de 19,4% et de 13,2% à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles ne sont pas unanimes sur la hausse ou la baisse des précipitations. En effet, le modèle IPSL prévoit une baisse de 7,5% par contre, le modèle NCC prévoit une hausse de 17%.

À la station de Odienné, les deux modèles ne sont pas unanimes sur les précipitations attendues à l'horizon 2030. Le modèle IPSL prévoit une hausse de 43,8% alors que le modèle NCC prévoit une baisse de 17,4%. À l'horizon 2050, c'est une hausse de 53,5% qui sera observée par le modèle IPSL et une hausse de 73,3% par le modèle NCC.

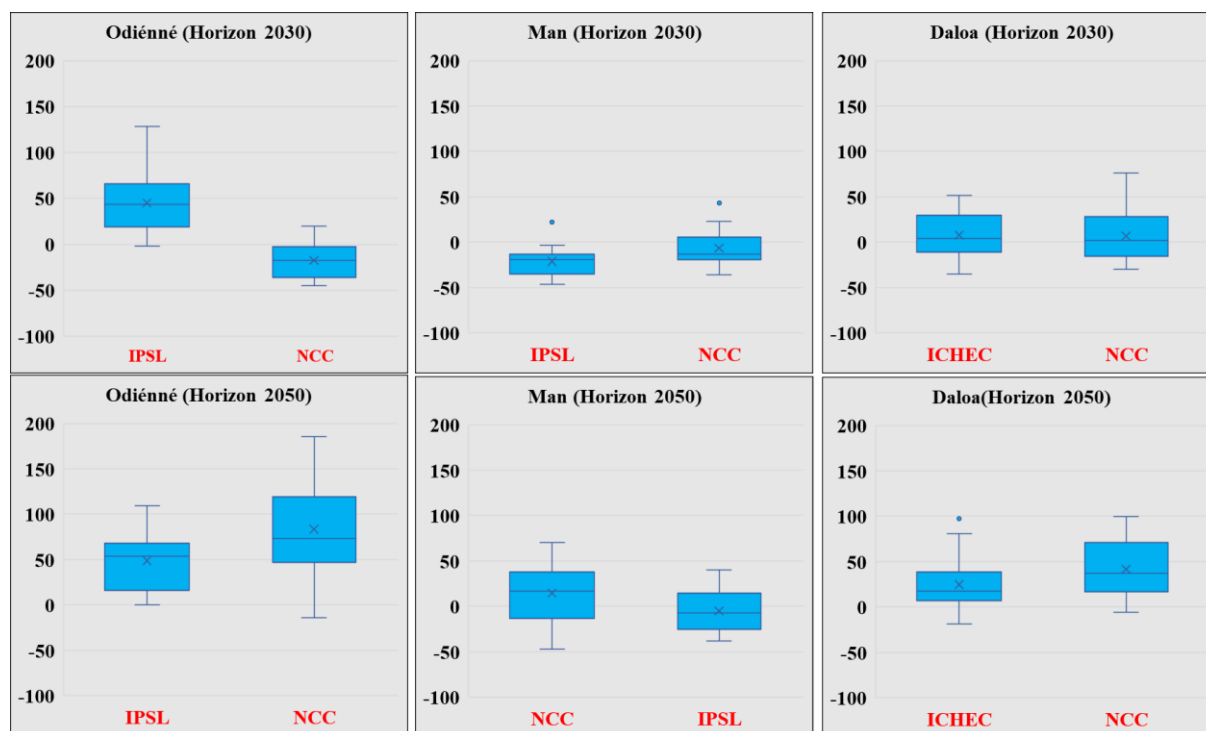


Fig. 13. Variation du cumul annuel des précipitations

■ Températures (Figure14)

À la station de Daloa, les modèles ICHEC et NCC prévoient respectivement des hausses de 3,4°C et de 4,6°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 4,4°C et de 5°C.

À la station de Man, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des hausses de 1,8°C et de 3,7°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 4,1°C et de 3,2°C.

À la station de Odiénné, les modèles IPSL et NCC prévoient respectivement des hausses de 2,1°C et de 2,2°C à l'horizon 2030. À l'horizon 2050, ces modèles prévoient des hausses de 3,3°C et de 4°C.

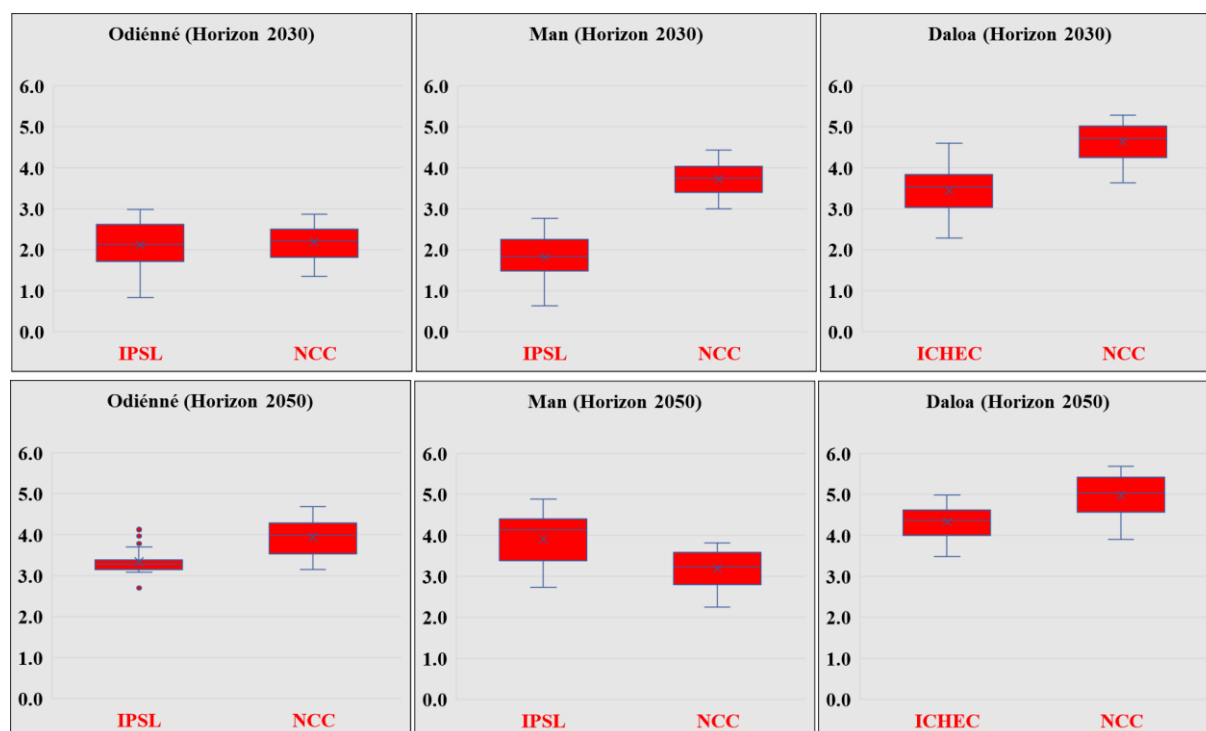


Fig. 14. Variation des températures moyennes annuelles

5 DISCUSSION

La méthode de correction des biais a permis d'éliminer les erreurs des modèles lors des simulations. Des incertitudes ont été observées. De telles incertitudes ont déjà été observées dans d'autres études comme celles de [18] dans le cas de la méthode de correction du biais de puissance a amélioré les statistiques de variabilité alors qu'elle s'est avérée mal ajuster la probabilité, et en même temps, la méthode de correction du biais de mise à l'échelle linéaire a pu éliminer efficacement le biais dans les précipitations moyennes [18]. Par conséquent, toutes les autres méthodes de correction du biais telles que la méthode du precipitation local intensity scaling, la méthode du power transformation of precipitation et la méthode Distribution Mapping (quantile mapping) ont montré leurs avantages respectifs, mais également des incertitudes dans la correction du biais des séries chronologiques de précipitations et de températures. Néanmoins, les résultats de cette étude ont montré la nécessité d'appliquer une correction de biais aux ensembles de données brutes des MCR avant de les déployer pour toute évaluation de l'impact du changement climatique. Pour l'application d'une correction de biais pour des études dans le domaine de l'hydrologie, [23] ont montré que la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) surpasse la méthode du precipitation local intensity scaling et la méthode du linear scaling (multiplicative and additive). Elle est de ce fait, la plus appropriée pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant. Également, pour quantifier les impacts du changement climatique sur la dynamique des débits, [18] ont montré que la méthode du Distribution Mapping (quantile mapping) et la méthode du variance scaling of temperature fonctionneraient mieux dans les statistiques basées sur la fréquence pour la température par rapport à la méthode du linear scaling. Ils ont noté, cependant, que la méthode du variance scaling of temperature fonctionnerait mieux que la méthode du Distribution Mapping pour les statistiques basées sur des séries chronologiques pour la température.

Concernant les projections futures, d'un point de vue général, le bassin versant du fleuve Sassandra connaîtra des perturbations dans le futur qui se traduiront par des variations à la hausse et à la baisse des précipitations et par la hausse des températures. Des études récentes menées sur les projections climatiques ont montré que l'Afrique de l'Ouest va connaître une hausse importante des températures associée à une forte variabilité des précipitations [24]. Ces changements climatiques pourraient entraîner des conséquences néfastes sur l'environnement telles que les inondations ou la sécheresse [25]. Se référant aux variations moyennes de températures prévues par les différents modèles, il est constaté que la zone d'étude enregistrera aux horizons 2030 et 2050, d'importants changements thermiques qui dépasseront ceux qu'elle a connus par le passé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) qui projette une augmentation de la température globale entre 1,4°C et 5,8°C d'ici la fin du siècle si la concentration du CO₂ double dans l'atmosphère, avec des conséquences sur l'environnement [2].

6 CONCLUSION

Cette étude a permis de choisir et de valider des modèles climatiques régionaux provenant de la base de données CORDEX-Afrique sur le bassin versant du fleuve Sassandra à Buyo en Côte d'Ivoire, d'une part, et d'estimer les changements du climat futur, d'autre part. Le choix des MCRs a montré que les modèles ICHEC, IPSL et NCC ont de bonnes performances (simulent bien le climat de la zone d'étude) mais avec des biais significatifs.

La simulation du climat futur par les modèles a montré des variations des paramètres climatiques. En effet, selon le scénario RCP 4.5, la pluviométrie pourrait connaître des fluctuations de -20,8% à +58,1% à l'horizon 2030 et de -18,8% à +61,7% à l'horizon 2050. Selon le scénario RCP 8.5, les MCRs prédisent les mêmes conditions que celles prévues par le RCP4.5. Ainsi, le RCP prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4% à +43,8% à l'horizon 2030 et de -7,5% à +73,3% à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1,6 à +4,4°C pour le RCP 4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP 8.5.

REFERENCES

- [1] Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Dje K.B., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergéo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 513, 29 p.
- [2] Guivarch C. & Cassen C. (2015). L'atténuation du changement climatique: retour sur le 5e rapport du Giec. *La Météorologie*, 2015 (88): 97–105.
- [3] Scouart Yeboah K.A., Akpoti K., Kobo-bah A.T., Ofosu E.A., Siabi E.K., Mortey E.M. & Okyereh S.A. (2022). Assessing climate change projections in the Volta Basin using the CORDEX-Africa climate simulations and statistical bias-correction. *Environmental Challenges*, 6: 18p.
- [4] Le Roux R., Katurji M., Zawar-Reza P., Quéno H. & Sturman A. (2018). Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the WRF model. *Environmental modelling & software*, 100: 67–73.
- [5] Li Z., Zheng F.-L., Liu W.-Z. & Jiang D.-J. (2012). Spatially downscaling GCMs outputs to project changes in extreme precipitation and temperature events on the Loess Plateau of China during the 21st Century. *Global and Planetary Change*, 82: 65–73.
- [6] Grenier P. (2018). Two types of physical inconsistency to avoid with univariate quantile mapping: A case study over North America concerning relative humidity and its parent variables. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57 (2): 347–364.
- [7] Souvignet M., Gaese H., Ribbe L., Kretschmer N. & Oyarzún R. (2010). Statistical downscaling of precipitation and temperature in north-central Chile: an assessment of possible climate change impacts in an arid Andean watershed. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 55 (1): 41–57.
- [8] Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., Döll P., Jimenez B., Miller K., Oki T., Şen Z. & Shiklomanov I. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological sciences journal*, 53 (1): 3–10.
- [9] Di Baldassarre G., Elshamy M., van Griensven A., Soliman E., Kigobe M., Ndomba P., Mutemi J., Mutua F., Moges S., Xuan Y., Solomatine D. & Uhlenbrook S. (2011). Future hydrology and climate in the River Nile basin: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 56 (2): 199–211.
- [10] Anoh K.A., Kouadio Z.A., Konaté D., Djè K.B., Kouassi K.H., Koua T.J.-J. & Dibi B. (2021). Analyse de la variabilité des perturbations climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré (Ouest de la Côte d'Ivoire). 54 (2): 90-101.
- [11] Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E. & Mahé G. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique. In: Regional hydrological impacts of climatic change: proceedings of the International Symposium on Regional Hydrological Impacts of Climatic Variability and Change with an Emphasis on Less Developed Countries (S6): held during the Seventh Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) at Foz do Iguaçu [sic], Brazil, 3-9 April, 2005, IAHS, 194p.
- [12] Coulibaly N., Coulibaly T., Mpakama Z. & Savané I. (2018). The Impact of Climate Change on Water Resource Availability in a Trans-Boundary Basin in West Africa: The Case of Sassandra. *Hydrology*, 5 (1): 12.
- [13] Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf P. (1971). Aperçu sur les régimes hydrologiques. *Milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoire ORSTOM*, 50: 109-155.
- [14] Perraud A. (1971). Les sols. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoire ORSTOM*, 50: 157-263.
- [15] Camus H. (1969). Hydrologie du bassin du Sassandra (note préliminaire). 5 (69): 79.

- [16] Konan B. (1990). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra à Soubré. Thèse (ph. D) 3eme cycle en Science et Gestion de l'Environnement, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 182p. - Recherche Google.
- [17] Taylor K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 106 (D7): 7183-7192.
- [18] Zhang B., Shrestha N.K., Daggupati P., Rudra R., Shukla R., Kaur B. & Hou J. (2018). Quantifying the impacts of climate change on streamflow dynamics of two major rivers of the Northern Lake Erie Basin in Canada. *Sustainability*, 10 (8): 2897.
- [19] Teutschbein C. & Seibert J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456: 12–29.
- [20] Thom H.C. (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly weather review*, 86 (4): 117-122.
- [21] Ines A.V. & Hansen J.W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and forest meteorology*, 138 (1-4): 44–53.
- [22] Bisht D.S., Mohite A.R., Jena P.P., Khatun A., Chatterjee C., Raghuwanshi N.S., Singh R. & Sahoo B. (2020). Impact of climate change on streamflow regime of a large Indian river basin using a novel monthly hybrid bias correction technique and a conceptual modeling framework. *Journal of Hydrology*, 590: 125448.
- [23] Willkofer F., Schmid F.-J., Komischke H., Korck J., Braun M. & Ludwig R. (2018). The impact of bias correcting regional climate model results on hydrological indicators for Bavarian catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19: 25-41.
- [24] Kouamé A.N., AMANI M.K., Gnaboa R., Traoré K.S. & Houenou P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé: cas de la ville de Yamoussoukro (centre de la Côte d'Ivoire). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (54): 135-154.
- [25] Sylla M.B., Nikiema P.M., Gibba P., Kebe I. & Klutse N.A.B. (2016). Climate change over West Africa: Recent trends and future projections. *Adaptation to climate change and variability in rural West Africa*,: 25-40.

RÉSUMÉ

En Côte d'Ivoire, la production de l'énergie hydroélectrique joue très grand rôle dans le mixte énergétique. Cette production dépend principalement des grands cours d'eaux qui sont sujets aux aléas climatiques. Les barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré produisent plus de la moitié de la production nationale en hydroélectricité. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. La méthodologie adoptée a consisté d'abord à faire une caractérisation hydro-climatique du bassin versant à l'aide des indices hydro-climatiques. Ensuite, la caractérisation hydro-climatique future aux horizons 2030 et 2050 par un choix de modèles MCRs dont les sorties ont été corrigées et utilisées pour l'estimation des impacts sur le climat et sur les écoulements. Enfin, l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la production de l'énergie du barrage hydroélectrique de Buyo où la démarche s'est basée sur l'analyse de la lame d'eau utile à la production de l'énergie. Les résultats de la variabilité hydro-climatique ont permis, d'une part, de relever des conditions prolongées de déficits hydro-pluviométriques depuis les années 1970 sur l'ensemble du bassin. D'autres parts, elle a relevé un retour pluviométrique vers la normale de la décennie 2011-2020. La caractérisation hydro-climatique future a permis de choisir et valider des modèles ICHEC, IPSL et NCC depuis la base de données CORDEX-Afrique afin de décrire le climat futur du bassin. Ainsi, le scénario RCP 4.5, prévoit des fluctuations de la pluviométrie de -20,8% à +58,1% à l'horizon 2030 et de -18,8% à +61,7% à l'horizon 2050. Le RCP 8.5 prévoit des fluctuations des précipitations de -19,4% à +43,8% à l'horizon 2030 et de -7,5% à +73,3% à l'horizon 2050. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +1.6 à +4,4°C pour le RCP 4.5 et de +2,1 à +5°C pour le RCP 8.5. Les résultats sur les écoulements simulés permettent de noter au niveau saisonnier, la conservation du régime hydrologique avec une modification du volume écoulé ainsi qu'une baisse du volume des écoulements à l'horizon 2050 (RCP4.5). Les écoulements annuels subiraient des hausses par rapport à la période 1981-2010. Au cours des années futures, il est prévu des augmentations des écoulements à l'horizon 2030 de 55% (RCP 4.5) et de 53% (RCP 8.5). Pour l'horizon 2050, le RCP 4.5 prévoit une augmentation de 2% et le RCP 8.5, une augmentation de 43%. Les écoulements baissent à l'horizon 2050, par rapport à 2030 (33%, RCP 4.5 et 7% RCP 8.5). Enfin, les résultats du troisième objectif spécifique montrent une distinction des années 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 et 2022 par une variabilité plus marquée que d'autres qui coïncident avec des années de sécheresses climatiques. Au cours de ces années, le niveau de crise. Les résultats ont également montré que les projections futures du climat indiquent de fortes variations de la pluviométrie et des températures qui entraîneraient des sécheresses sévères à extrêmes au cours des années 2023, 2029, 2041 (RCP 4.5) et de 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 et 2059 (RCP 8.5). Ainsi, au cours des années où la sécheresse serait mise dans les classes de modérée à extrême, la lame d'eau pourrait être inférieure à la normale, ce qui pourrait entraîner une réduction de la production hydroélectrique.

Mots-clés : Energie hydroélectrique, variabilité hydro-climatique, fleuve Sassandra, Barrage de Buyo, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, hydroelectric power plays a major role in the energy mix. This production depends mainly on large rivers, which are subject to the vagaries of climate. The Buyo and Soubré hydroelectric dams produce more than half the country's hydroelectricity. This thesis is part of the fight against climate change. The methodology adopted first consisted of carrying out a hydro-climatic characterization of the watershed using hydro-climatic indices. Then, the future hydro-climatic characterization for 2030 and 2050 by a choice of MCR models whose outputs have been corrected and used to estimate the impacts on the climate and on flows. Finally, the assessment of the impacts of climate change on the energy production of the Buyo hydroelectric dam where the approach was based on the analysis of the layer of water useful for energy production. The results of hydro-climatic variability made it possible, on the one hand, to identify prolonged conditions of hydro-rainfall deficits since the 1970s across the entire basin. On the other hand, it noted a return to normal rainfall for the 2011-2020 decade. The future hydro-climatic characterization made it possible to choose and validate ICHEC, IPSL and NCC models from the CORDEX-Africa database in order to describe the future climate of the basin. Thus, the RCP 4.5 scenario forecasts fluctuations in rainfall from -20.8% to +58.1% by 2030 and from -18.8% to +61.7% by 2050. RCP 8.5 forecasts fluctuations in precipitation from -19.4% to +43.8% by 2030 and from -7.5% to +73.3% by 2050. All models predict an increase of the temperature according to the two scenarios from +1.6 to +4.4°C for RCP 4.5 and from +2.1 to +5°C for RCP 8.5. The results on the simulated flows make it possible to note at the seasonal level, the conservation of the hydrological regime with a modification of the flow volume as well as a drop in the flow volume by 2050 (RCP4.5). Annual flows would increase compared to the period 1981-2010. In future years, increases in flow are expected by 2030 of 55% (RCP 4.5) and 53% (RCP 8.5). For 2050, RCP 4.5 provides for an increase of 2% and RCP 8.5, an increase of 43%. Runoffs decrease by 2050, compared to 2030 (33%, RCP 4.5 and 7% RCP 8.5). Finally, the results of the third specific objective show a distinction between the years 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2020, 2021 and 2022 by a more marked variability than others which coincide with years of drought climatic. During these years, the crisis level. The results also showed that future climate projections indicate large variations in rainfall and temperatures that would lead to severe to extreme droughts during the years 2023, 2029, 2041 (RCP 4.5) and 2021, 2028, 2040, 2041, 2058 and 2059 (RCP 8.5). Thus, in years where the drought would be classified as moderate to extreme, the water level could be lower than normal, which could lead to a reduction in hydroelectric production.

Keywords: Hydroelectric energy, hydro-climatic variability, Sassandra River, Buyo Dam, Côte d'Ivoire.