



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

UFR ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE :
2018-2019

N° D'ORDRE : 0261 / 2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414006279

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option : Hydrologie (Climatologie)

THEME :

**Caractérisation de la variabilité climatique du bassin du
fleuve Sassandra à Soubré
(Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
DES SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

MORY Koutohi Jocelin

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement
le : 09/ 06/ 2020.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	i
DEDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS	4
1.1. Description de la zone d'étude	5
1.2. Régime climatique.....	5
1.3. Relief	7
1.4. Géologie	8
1.5. Végétation	9
1.6. Réseau hydrographique	10
1.7. Variabilité et changement climatique.....	12
1.7.1. Définition	12
1.7.1.1. Climat.....	12
1.7.1.2. Variabilité climatique.....	12
1.7.1.3. Causes de la variabilité climatique.....	12
1.7.1.4. Impacts sectoriels de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire.....	13
1.7.2. Définition de scénario climatique	14
1.7.3. Description des scénarios RCP	14
1.8. Modèles climatiques.....	15
1.8.1. Modèles Climatiques Globaux (MCG)	15
1.8.2. Modèles Climatiques Régionaux (MCR).....	16
1.8.3. Faiblesses des modèles climatiques	16

1.8.4. Description du projet CMIP	17
Conclusion partielle	17
PARTIE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODES	18
2.1. Matériel	18
2.1.1. Données	19
2.1.1.1. Données d'observation.....	19
2.1.1.2. Données de simulation et de projection	20
2.1.1.3. Modèle numérique d'Altitude	20
2.1.2. Matériel de traitement des données	21
2.2. Méthodes	21
2.2.1. Critique et analyse des données pluviométriques	21
2.2.2. Caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré.....	22
2.2.2.1. Méthodes de calcul des paramètres statistiques	22
2.2.2.2. Méthodes des indices climatiques.....	22
2.2.2.3. Fréquence des séquences de sécheresse.....	24
2.2.2.4. Méthode des anomalies	24
2.2.3. Caractérisation des changements climatiques aux horizons 2030 et 2050.....	25
2.2.3.1. Évaluation de la fiabilité des sorties du modèle climatique régional RCA4	25
2.2.3.2. Correction des données de sortie du modèle.....	26
2.2.3.3. Évaluation de la corrélation entre les données corrigées et observées	27
2.2.3.4. Analyse du changement climatique	27
Conclusion partielle	28
PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	29
3.1. Résultats	
3.1.1. Caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant du fleuve Sassandra	29
à Soubré.....	29

3.1.1.1.	Analyse de la variabilité décennale de la période 1981-2010.....	29
3.1.1.2.	Analyse de la variabilité annuelle du climat	31
3.1.1.3.	Fréquence des séquences de sécheresse météorologique.....	32
3.1.1.4.	Comparaison des normales 1981-2010 et 1971-2000.....	32
3.1.2.	Caractérisation des changements climatiques aux horizons 2030 et 2050 du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré	34
3.1.2.1.	Fiabilité des précipitations et températures du modèle climatique RCA4... ..	34
3.1.2.2.	Évaluation de la corrélation entre les données simulées et observées	35
3.1.2.3.	Analyse de la variabilité saisonnière.....	36
3.1.2.4.	Comparaison entre précipitations de la période 1981-2010 et précipitations des horizons futurs (2030 et 2050).....	38
3.2.	Discussion	42
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....		45
RÉFÉRENCES.....		48

DEDICACE

Je dédie ce travail à mon père MORY Athanase, à ma mère FONHON Gbana Victorine et à tous mes frères et sœurs.

REMERCIEMENTS

Je voudrais au terme de ce travail, exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui, par leur aide morale et matérielle, m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

Je saisis l'opportunité pour remercier l'administration de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE.

J'adresse mes remerciements à tous les enseignants-chercheurs de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête le Directeur de l'UFR le Docteur KOUASSI Kouakou Lazare.

Mes vifs remerciements vont à l'endroit des membres du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UJLoG, pour leur aimable accueil et leur disponibilité. Je remercie plus particulièrement Docteur DIBI Brou, Directeur du LSTE pour avoir accepté de m'accueillir dans son laboratoire.

Mes salutations les plus distinguées vont à l'égard du Docteur KOUADIO Zilé Alex qui m'a fait l'honneur de diriger ce mémoire, et de m'offrir ainsi l'occasion de faire mes premiers pas dans la recherche. Au-delà d'un encadrement scientifique de qualité, il a toujours su prendre le temps de m'écouter, de me conseiller et de m'encourager. Je ne saurais trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur Anoh Kouao Arnaud, encadreur de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur MANGOUA OI Mangoua Jules, Responsable du niveau Master 2 G.E.E.

J'exprime toute ma gratitude aux autorités de la Direction de la SODEXAM avec à sa tête Monsieur MOULOT Jean-Louis pour avoir accepté que je fasse une partie de mon stage dans leur structure.

J'exprime toute ma reconnaissance au Directeur de la météorologie Nationale, Monsieur KONATE Daouda qui a accueilli favorablement ma demande de stage.

Je remercie le Docteur DJE KOUAKOU Bernard, Chef du Département Climatologie Applications Météorologiques de la Direction de la météorologie nationale pour l'assistance

qu'il m'a apporté pour mon intégration au sein de leur équipe et dans la réalisation de mon travail.

J'exprime ma reconnaissance à Messieurs COULIBALY Kolotioloma Alama et à SOUMAHORO Lamine Ahmed, Ingénieurs, à la Direction de la Météorologie Nationale pour leur disponibilité dans la collecte des informations et leur implication ardue dans la réalisation de ce mémoire.

À la famille MAH, je vous suis reconnaissant pour m'avoir pris comme l'un des vôtres depuis mon arrivée dans cette ville. Merci infiniment. Puisse Dieu vous le rendre au centuple.

Je remercie mes amis de promotion qui depuis des années m'apportent leur soutien et leur conseil ainsi que leurs remarques constructives tout au long de mon parcours jusqu'à la rédaction de ce présent mémoire. Je pense tout particulièrement à OUEDRAOGO Sadiatou, OBA Elisé Médard, MLAN Kouadio François, N'GUESSAN Hijins Epaphrodite et YAO Anne Josiane Larissa.

À GOE Bi Séhi Antoine et YAO N'da Marie-Rebeca merci pour votre participation à la rédaction de ce mémoire.

J'aimerais que tous les agents de la SODEXAM et particulièrement Mademoiselle KOUAME Affoué Epiphanie et Monsieur NIAMKE Marius qui ont contribué au bon déroulement de mon stage trouvent dans ces quelques lignes une marque de respect et l'expression de mon admiration distinguée en leur personne.

Je remercie les stagiaires de la Direction de la Météorologie Nationale pour les moments passés ensemble, notamment pour leur soutien moral et surtout leurs critiques constructives.

D'autres personnes m'ont apporté leur soutien à travers leur amitié et des discussions fructueuses. Qu'elles daignent bien me pardonner de ne pas les avoir citées, mais qu'elles soient assurées de ma sincère sympathie.

Je remercie les Doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), en particulier KOFFI Bérenger pour leurs disponibilités dans l'amélioration de ce travail.

Je remercie aussi mes camarades de la quatrième (04^{ème}) promotion de Génie de l'Eau et l'Environnement (G.E.E.) pour leur appui. Je pense particulièrement à DONGA Kumba

Carmen Evelyne, KONAN Oi Yao Noel Xavier et YEO Nonwa Seydou.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BHC	: Bilan Hydrique Climatique
CMIP	: Coupled Model Intercomparaison Project
ESRI	: Environmental System Research Institute
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
LSTE	: Laboratoire Des Sciences Et Technologies De l'Environnement
MCG	: Modèle Climatique Global
MCR	: Modèle Climatique Régional
OMM	: Organisation Météorologie Mondiale
RCA4	: Rossby Centre Atmospheric Regional Model version 4
RCP	: Representative Concentration Pathway
SIG	: Système d'Information Géographique
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique
SPEI	: Indice Standardisé de Précipitation et d'Évapotranspiration
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques principales des RCP (GIEC, 2007)	15
Tableau II : Stations météorologiques de la zone d'étude	19
Tableau III : Classification du degré de sécheresse et d'humidité en fonction des indices standardisés de précipitations et d'évapotranspiration (Bouly et al., 2020)	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude	5
Figure 2 : Régimes climatiques du bassin versant du Sassandra à Soubré avec une illustration du régime pluviométrique.	7
Figure 3 : Carte du relief de la zone d'étude	8
Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude.....	9
Figure 5 : Carte de la végétation	10
Figure 6 : Carte du réseau hydrographique	11
Figure 7 : Localisation spatiale des stations météorologiques	200
Figure 8 : Tendances des précipitations annuelles sur la période 1981-2010	29
Figure 9 : Evolution des températures moyennes annuelles durant la période 1981-2010 sur le bassin du fleuve Sassandra à Soubré	29
Figure 10 : Évolution temporelle des valeurs SPEI sur des échelles de temps 12 et 24 mois de 1981 à 2010 sur le bassin du Sassandra à Soubré	30
Figure 11 : Fréquences des séquences de sécheresse (1981-2010)	31
Figure 12 : Précipitations et températures moyennes mensuelles du climat observé sur les périodes 1971-2000 et 1981-2010 sur le bassin du Sassandra à Soubré	32
Figure 13 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées (sur le bassin) sur la période 1981-2010	33
Figure 14 : Comparaison des températures minimales et maximales interannuelles observées et simulées et sur la période de référence (1981-2010)	34
Figure 15 : Corrélation entre les précipitations observées et corrigées	35
Figure 16 : Corrélation entre températures observées et corrigées sur la période 1981-2010	35
Figure 17 : Variation temporelle des valeurs SPEI des périodes 2021-2040 et 2041 à 2060 dans le cas du scénario RCP4.5 sur le bassin du Sassandra à Soubré	36
Figure 18 : Variation temporelle des valeurs SPEI des périodes 2021-2040 et 2041 à 2060 dans le cas du scénario RCP8.5 sur le bassin du Sassandra à Soubré	37
Figure 19 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles interannuelles observées sur le bassin et projetées à l'horizon 2030 et 2050	38
Figure 20 : Variation moyenne mensuelle des températures minimales interannuelles sur le	

bassin du Sassandra à Soubré aux horizons 2030 et 2050 39

Figure 21 : Variation moyenne mensuelle des températures maximales interannuelles sur le

bassin du Sassandra à Soubré aux horizons 2030 et 2050 40

INTRODUCTION

Le changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) et notamment du CO₂ est l'un des défis majeurs de l'époque contemporaine. Ainsi, depuis ces dernières décennies, un intérêt soutenu s'est manifesté en faveur de l'étude du climat et notamment de sa variabilité (Ardoin, 2004), compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celui-ci peut entraîner, quelle que soit la région de la planète. Bien que l'Afrique soit le continent le moins responsable du changement climatique, il est particulièrement vulnérable à ses conséquences.

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, est la source d'approvisionnement des barrages hydro-électriques de Buyo et de Soubré. Ce bassin est une zone agricole (avec des plantations de café, de cacao, etc.) et n'est 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). Cependant, selon Brou (2005), la dégradation de la couverture végétale a une influence sur les régimes climatiques et hydrologiques. De même, la dégradation du paysage conduit à l'intensification de l'érosion et par ricochet perturbe le bilan hydrologique (Anoh *et al.*, 2017). En outre, les Etats africains sont les plus vulnérables aux phénomènes extrêmes du fait des perturbations climatiques (inondations, sécheresses) en raison de leur situation économique, sociale et démographique (Kouassi, 2007). Vu que le cycle de l'eau est l'une des composantes majeures du climat (Anoh, 2014), d'importantes études ont été réalisées par Ouédraogo (2001), Ardoin (2004), Goula *et al.* (2006), Kouassi (2007), Adja (2009), Saley *et al.* (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. Ces études 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). La baisse de la pluviométrie a eu des répercussions importantes aux plans agronomique et hydrologique, mais aussi économique, social que politique. Cependant il y a donc un intérêt particulier à étudier les changements climatiques en Côte d'Ivoire ainsi que leurs impacts sur les ressources en eau afin de garantir la pérennité de ces ressources pour la pratique des nombreuses activités anthropiques dont dépend notre pays pour son développement.

Les manifestations de la variabilité du climat et sa relation avec la variabilité des ressources en eau constituent aujourd'hui une problématique de développement en ce sens qu'elles débouchent sur l'élaboration de scénarii permettant la prévision de la gestion durable des ressources en eau (Kouassi, 2007). C'est dans cette optique que cette étude dont le thème est :

« **Caractérisation de la variabilité climatique du bassin du fleuve Sassandra à Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)** » a été initiée. Elle répond à un objectif général qui est de caractériser la variabilité climatique. De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser la variabilité climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré ;
- caractériser les changements climatiques aux horizons 2030 et 2050 du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré.

Ce présent mémoire s'articule autour de trois parties :

- la première partie porte sur les généralités liées à la zone d'étude ainsi que les notions sur la thématique abordée ;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés ;
- la troisième partie donne les résultats obtenus, suivis de leur interprétation et de la discussion qui en découle.

Une conclusion générale et des perspectives de l'étude achèvent ce mémoire.

PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS

1.1. Description de la zone d'étude

La zone d'étude est le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré (Figure 1). Elle est située entre 5°60' et 9°50' de latitude Nord et 6°0' et 8°20' de longitude Ouest. Elle a une superficie de 54 670 km². Le bassin versant du Sassandra à Soubré est un sous-bassin du bassin versant du fleuve Sassandra qui a une superficie de 75 000 km² dont 8 000 km² est située hors du territoire ivoirien (Camus, 1969 ; Konan, 2001 ; Agbri *et al.*, 2010 ; Sorokoby, 2013).

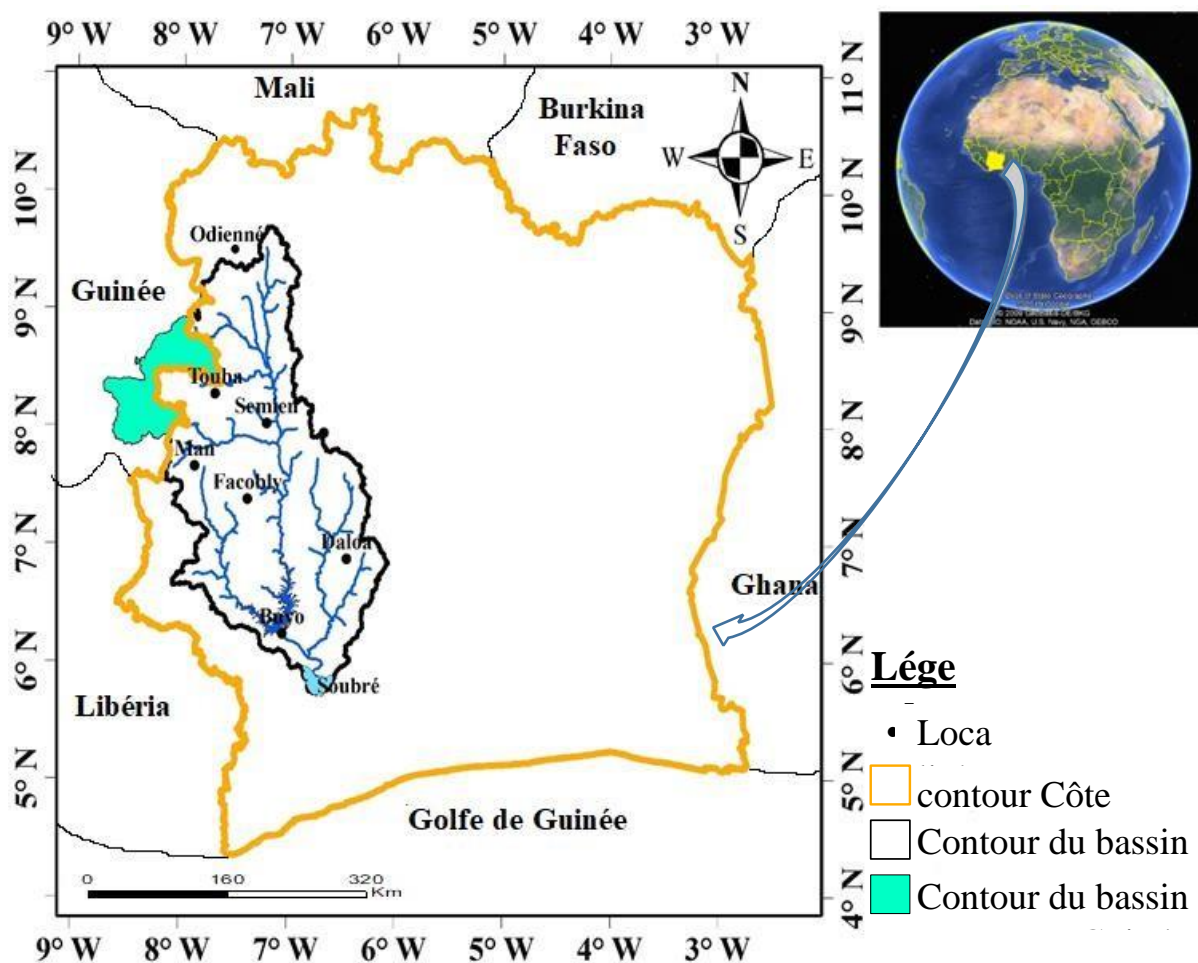


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

1.2. Régime climatique

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré est parcouru par trois (3) régimes pluviométriques (Figure 2) (Bourgin & Chenet, 2015).

🌍 Climat tropical de transition atténué

Les régimes pluviométriques permettent de différencier deux faciès :

- le régime sud-soudanien : c'est une bande qui fait la transition entre un climat Soudanien du type tropical et le régime subéquatorial ;

- le régime soudanien caractérisé par ses traits typiquement tropicaux.

Cette zone climatique limitée au sud par la parallèle 8°N est caractérisée par une saison des pluies (de juin à octobre) et une saison sèche (de novembre à avril), avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1 368 mm et un écart-type de 52,1 mm sur la période 1981-2010. Les valeurs moyennes mensuelles des températures relevées sur la période 1981 à 2010 oscillent entre 30 et 38 °C avec un écart-type de 2,3 °C (Soro, 2011).

Climat équatorial de transition atténué

C'est un climat de transition entre les climats équatoriaux et tropicaux. Les valeurs moyennes mensuelles de la température indiquent que les mois de février, mars et avril sont les plus chauds avec des températures supérieures ou égales à 27 °C. Les précipitations varient de 922 à 1 700 mm et contribuent à distinguer trois faciès ; notamment les faciès baouléen du Sud-Ouest, baouléen du Sud-Est et baouléen du Nord.

Ce régime est caractérisé par quatre (4) saisons :

- une grande saison des pluies (mars à juin) ;
- une petite saison sèche (juillet à août) ;
- une petite saison des pluies (septembre et octobre) ;
- une grande saison sèche assez marquée (novembre à février).

Climat de montagne ou régime de montagne

C'est un type de climat azonal, très influencé par des facteurs orographiques locaux du fait de la localisation de l'aire concernée à l'extrémité occidentale des reliefs de la dorsale guinéenne (Bourgin & Chenet, 2015). Il s'agit en réalité d'une zone charnière entre les climats subéquatoriaux, tropicaux humides sub-guinéens et tropicaux. Les hauteurs de pluies de cette zone se situent entre 1 250 mm et 2 064 mm par an (Soro, 2011). Elles sont les plus élevées du bassin. Contrairement aux hauteurs de pluies, les températures sont les plus basses du bassin avec des valeurs oscillant entre 23 et 26 °C. Il faut noter que ce régime est caractérisé par deux saisons :

- une saison des pluies assez longue (mars à octobre) ; - une saison sèche courte (novembre à février).

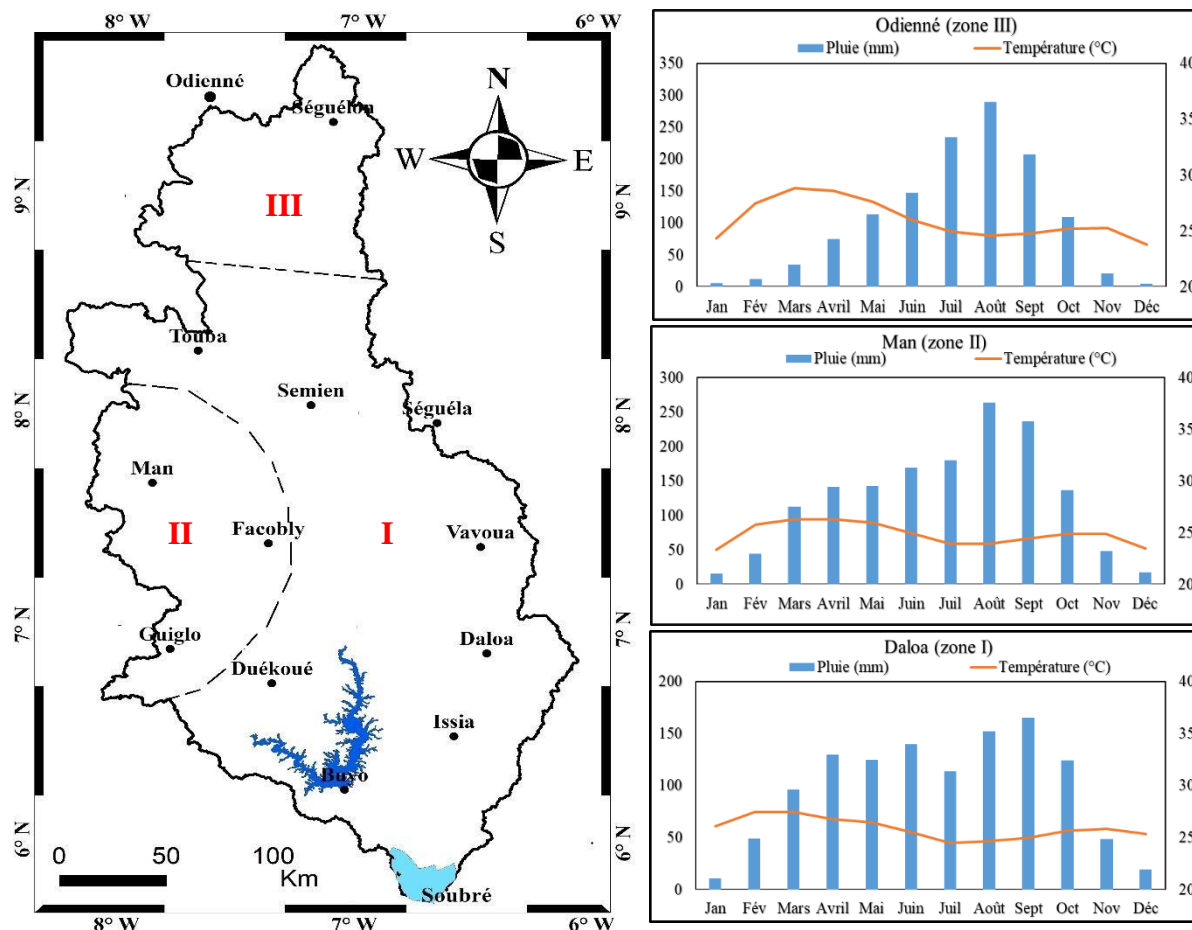


Figure 2 : Régimes climatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré I) Régime équatorial de transition atténué, II) Régime de montagne, III) Régime tropical de transition atténué.

1.3. Relief

Le relief de la zone d'étude est peu contrasté (Figure 3). Deux grands types de reliefs sont visibles :

- les plateaux qui prolongent les plaines vers le Nord et s'en détachent progressivement. Les altitudes varient entre 200 et 500 m ;
- les massifs montagneux, localisés dans l'Ouest se situent dans la région de Man avec des altitudes supérieures à 1 160 m. Dans cette région, on rencontre des points remarquables tels que les monts Dan et Tonkpi qui culminent entre 1 100 et 1 180 m.

Au Centre et au Sud du bassin versant, la majorité des altitudes est inférieure à 365 m.

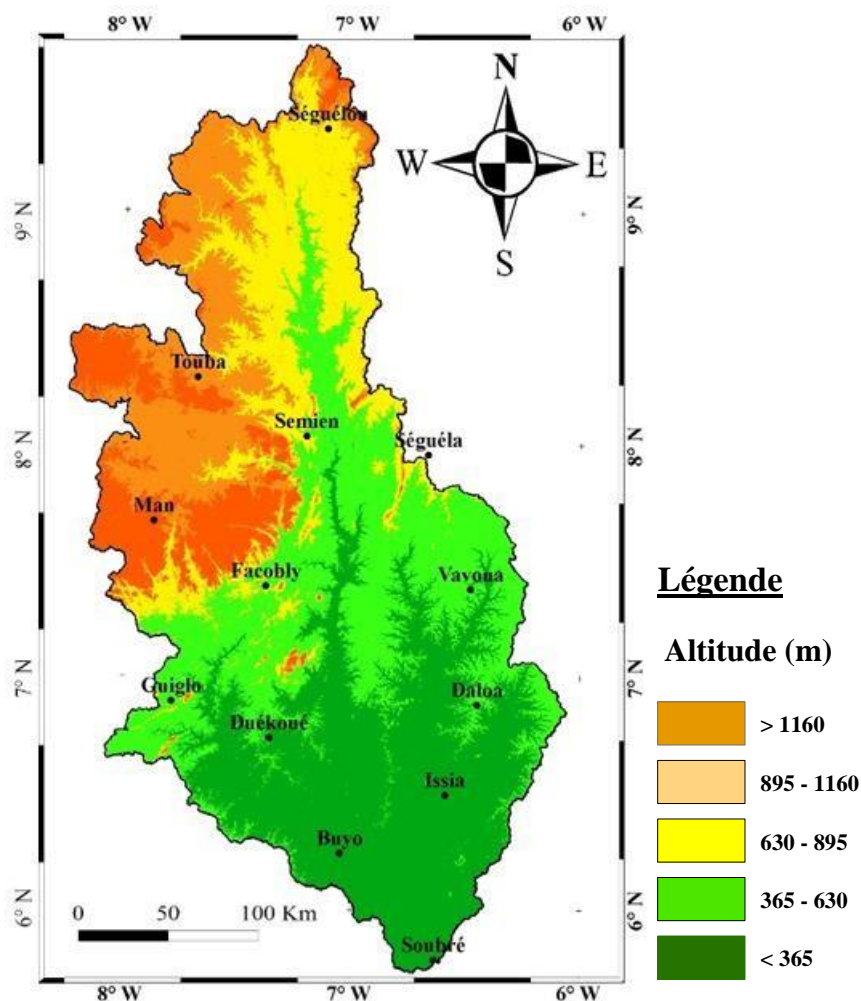


Figure 3 : Carte du relief de la zone d'étude

1.4. Géologie

La Côte d'Ivoire se situe au Sud du craton Ouest africain et son histoire géologique s'intègre dans celle de la dorsale de Man qui se subdivise en deux grands domaines : le domaine archéen à l'Ouest et le domaine protérozoïque à l'Est. Ces deux domaines sont séparés par l'accident majeur du Sassandra. Les formations géologiques du bassin versant du Sassandra appartiennent aux deux domaines et regroupent deux grandes entités géologiques que sont les roches magmatiques et les roches métamorphiques (Figure 4).

➤ Roches magmatiques

La composition des roches magmatiques du bassin versant du Sassandra varie du granite au granodiorites. Les principales roches magmatiques rencontrées sur l'ensemble de ce bassin sont les granitoïdes telles que les granitos hétérogènes biotites localisées en grande partie au Centre, à l'Est et au Nord du bassin versant. On note également la présence des

anorthosites, des norites, des charnockites à l'Ouest et au Nord-Ouest. Les granodiorites quant à elles sont localisées en grande partie à l'Est et au Sud du bassin versant.

➤ Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques du bassin versant du Sassandra sont en grande partie composées de migmatite, mylonite, gneiss et schiste. Les migmatites sont présentes majoritairement à l'Est, à l'Ouest et au Sud-Ouest du bassin. Le lit du cours d'eau principal baigne dans les mylonites. Les gneiss sont localisés au Nord de la zone d'étude. Les formations schisteuses sont plus intenses au Centre-Ouest du bassin versant du Sassandra (Ardoin, 2004).

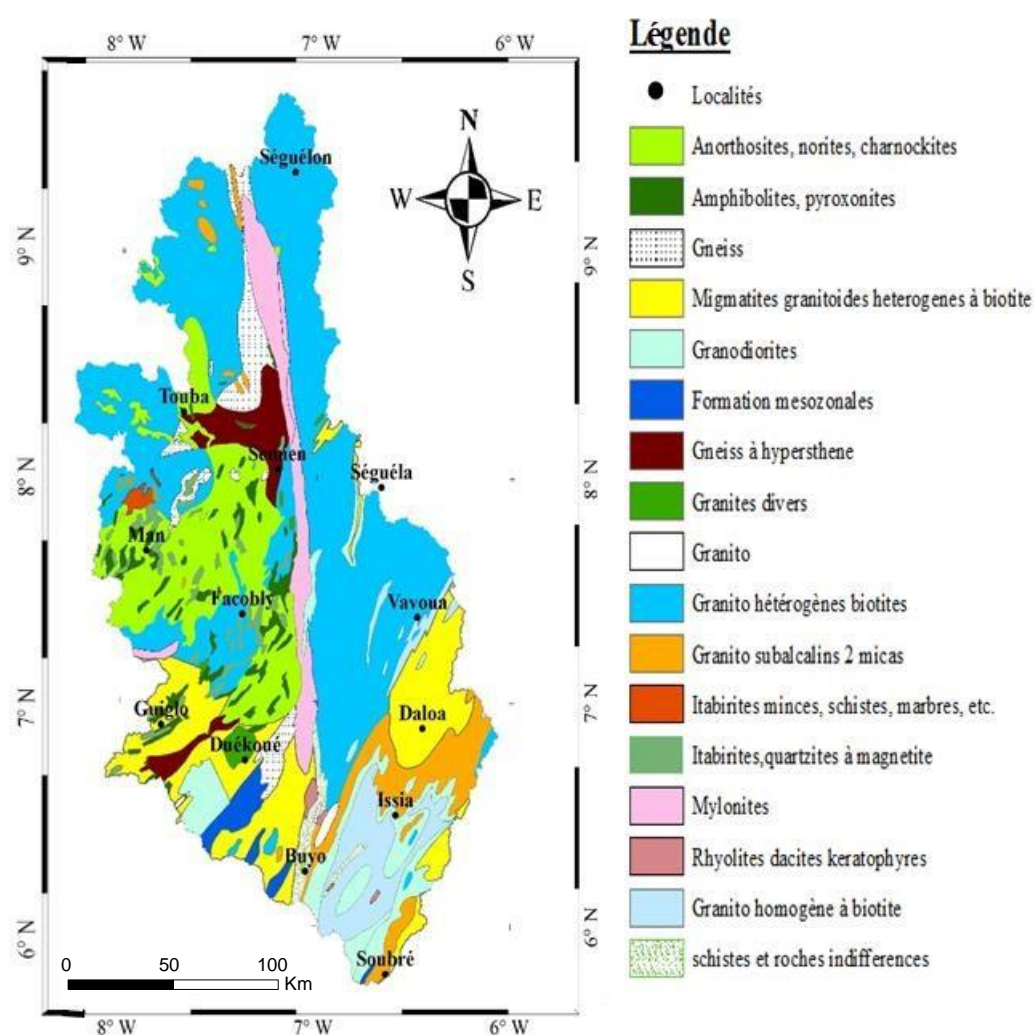


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude

1.5. Végétation

Le bassin versant du Sassandra est couvert par deux types de végétations. Il s'agit d'un paysage forestier et de savane. La classification des régions agro-climatiques permet de faire les distinctions suivantes (Figure 5) :

Le Bas-Sassandra forestier occupe les massifs forestiers du Sud auxquels se rattachent le massif montagneux de Man. Il est limité au Nord par la ligne Guitry-Soubré-Duékoué qui remonte le long du Sassandra à l'Ouest jusqu'au niveau du massif de Man. Il est couvert d'une forêt dense humide sempervirente (secteur hyper ombrophile et secteur ombrophile) (Jourda, 2009). Selon le même auteur, le Moyen Sassandra forestier situé au Nord de la zone précédente, est limité au Nord par les deux branches du « V » Baoulé et l'Ouest par le Sassandra. Il est couvert d'une forêt dense, semi-décimée (secteur mésophile). Le Sassandra pré-forestier occupe une bande centrale située au-dessus de la forêt mésophile et limitée au Nord par la ligne Nassian-Kani. Des blocs et des îlots de forêt dense humide mésophile et de forêt dense sèche sont inclus dans une savane plus ou moins boisée appartenant aux savanes guinéennes.

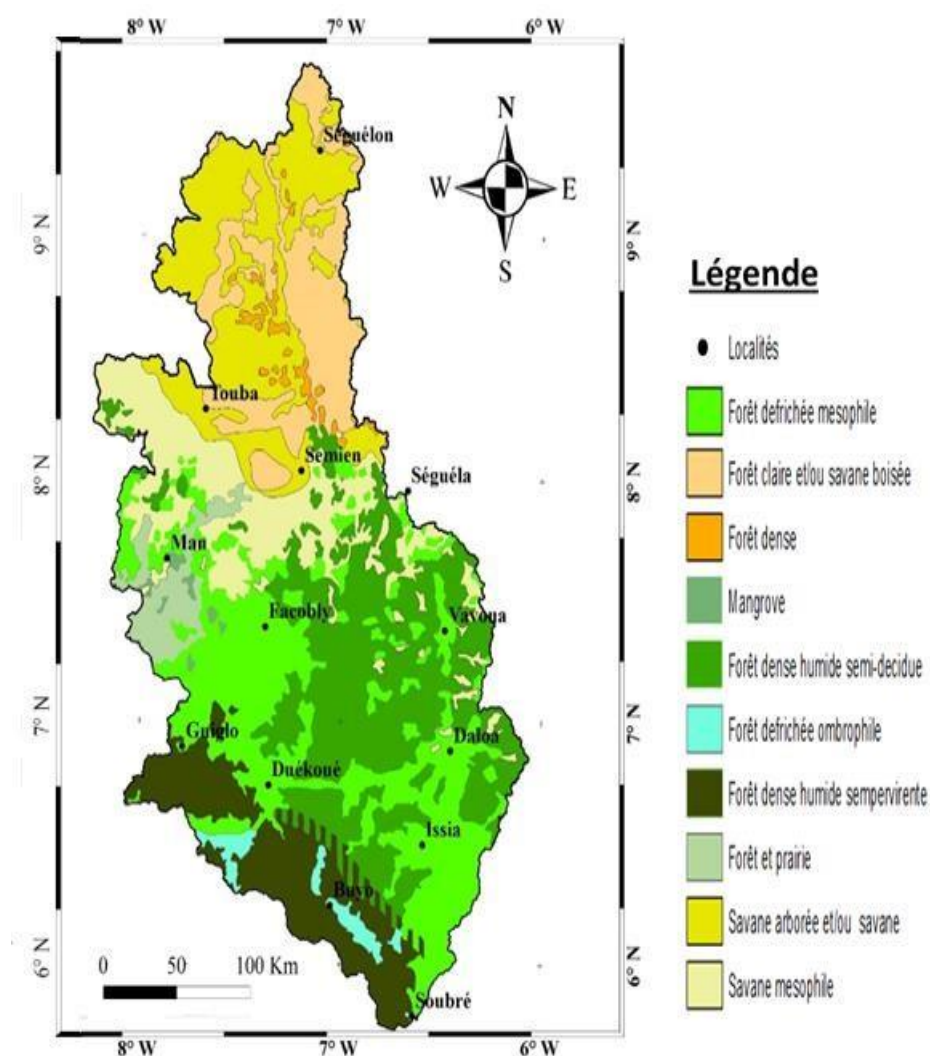


Figure 5 : Carte de la végétation

1.6. Réseau hydrographique

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée, sous le nom de Féroudougouba (Figure 6). La partie du bassin versant du fleuve Sassandra sur le territoire

ivoirien se limitant à Soubré, couvre une superficie d'à peu près 54 670 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 : rapides Bale, Broudé, Barakué, Poutopotou, Bola. Puis il reçoit, en rive gauche, la Lobo qui est le dernier affluent avant la localité de Soubré (Touchebeuf & Girard, 1962; Camus, 1969; Girard *et al.*, 1970).

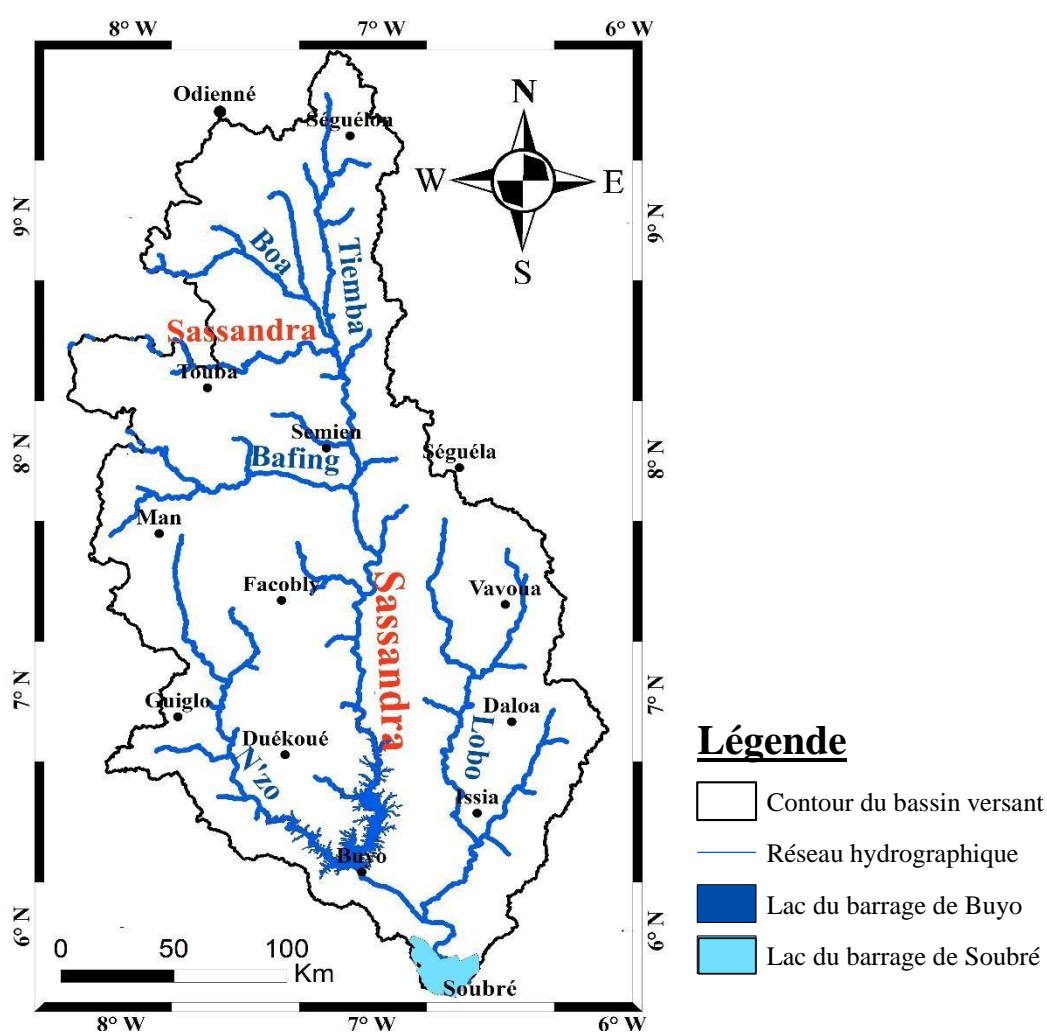


Figure 6 : Carte du réseau hydrographique

1.7. Variabilité et changement climatique

1.7.1. Définition

1.7.1.1. Climat

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) définit le climat comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné calculées d'après les observations (GIEC, 2007). Il est donc 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. Elle s'appuie sur les valeurs fournies par la météorologie pour caractériser les états de l'atmosphère : la température de l'air, la pluie, la durée de l'insolation, la direction du vent, etc. (Rakotondrabe, 2007).

1.7.1.2. Variabilité climatique

La variabilité climatique fait référence à une variation de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écart-types, apparition d'extrêmes etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales autres que celles de phénomènes météorologiques particuliers (Steffen & Tyson, 2001). Selon Niassé *et al.* (2004) et Sorokoby (2013), la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra ou interannuelle du climat. 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).

1.7.1.3. Causes de la variabilité climatique

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.

1.7.1.4. Impacts sectoriels de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire

Agriculture

La modification des paramètres climatiques ces dernières décennies a occasionné une inadéquation entre les calendriers de la météorologie et des saisons culturelles. Des études de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) montrent que la saison des pluies s'est raccourcie en moyenne de 10 à 27 jours sur le littoral. Les retards de démarrage de la saison varient d'une à deux semaines selon la localité. Il est aussi indiqué qu'en Côte d'Ivoire, les perturbations pluviométriques ont eu un impact significatif sur la production du cacao dont le rendement chute de plus de 20 % pendant les épisodes El Niño par rapport aux campagnes des décennies précédentes. Par ailleurs, les déficits de production constatés et amplifiés par les modifications climatiques, mettent en mal la sécurité alimentaire des populations qui dépendent directement de ce qui est produit dans les exploitations agricoles pour couvrir leurs besoins en alimentation. De plus les impacts des changements se traduisent aussi par la perte des récoltes liée aux calamités telles que les inondations, la sécheresse, les feux de brousse qui sont d'origine climatique (Djè, 2014).

Ressources en eau

La variabilité climatique, de par son effet sur les températures et la pluviométrie contribue à accroître la vulnérabilité relative des ressources en eau en Côte d'Ivoire malgré les nombreux outils de gestion des ressources en eau 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 (Ardoin, 2004).

Santé humaine

La Côte d'Ivoire se trouve exposée à diverses maladies liées aux aléas du climat. On observe une recrudescence des maladies telles que le paludisme, les infections respiratoires, les maladies diarrhéiques, la malnutrition, la rougeole. Il faut souligner aussi, une irruption régulière de l'harmattan au cours de la saison sèche sur le Sud du pays atteignant même le littoral. Cette perturbation a pour conséquence le déplacement de la ceinture de la méningite du 8^{ème} parallèle en zone forestière. En sus, les maladies d'origines hydriques telles que le choléra sont dues à la rareté des réserves en eau (Djè, 2014).

Ressources côtières

L'érosion côtière est un phénomène naturel accentuée par la variation des paramètres climatiques et certaines perturbations d'ordre socio-économiques 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 côtes maritimes, etc. (Djè, 2014).

1.7.2. Définition de scénario climatique

Un scénario est une représentation cohérente du futur état du monde. 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.

1.7.3. Description des scénarios RCP

Afin de représenter les évolutions possibles des émissions et pour que les modélisations climatiques soient comparables entre elles, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a choisi de créer des scénarios d'émissions. Ces scénarios sont utilisés en entrée des simulations climatiques et sont ensuite analysés à travers les rapports d'évaluation afin d'observer la réponse du climat. Dans son cinquième rapport, le GIEC a produit de nouveaux scénarii d'émission qui sont les RCP (profils représentatifs d'évolution des concentrations). Ce 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 I.

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 I : Caractéristiques principales des RCP (GIEC, 2007)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)		Trajectoire
		>1370 eq-CO ₂ en 2100		Croissance
	≈6Wm ² au niveau de stabilisation après 2100	≈850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	≈4,5Wm ² au niveau de stabilisation après 2100	≈660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ≈3Wm ² avant	Pic ≈490 eq-CO ₂ avant 2100	puis déclin	Pic puis déclin

Parmi les quatre scénarii d'émissions décrits plus haut, les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 sont plus réalistes. Alors notre choix s'est porté sur ces deux scénarii, car l'un constituerait un scénario intermédiaire rendant compte des efforts déployés pour atténuer les changements climatiques. L'autre quant à lui est considéré comme un scénario pessimiste. Il suppose qu'il n'y aura pas d'action internationale efficace sur les changements climatiques. En plus avec une forte croissance démographique et des revenus plus faibles dans les pays en développement, nous aurons des émissions plus élevées de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre.

1.8. Modèles climatiques

1.8.1. Modèles Climatiques Globaux (MCG)

Les modèles climatiques globaux sont une représentation mathématique simplifiée du système climatique fondée sur des lois physiques (Kouakou, 2011). Un modèle de circulation générale (MCG) fonctionne 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. La fréquence à laquelle les processus sont calculés à l'intérieur du modèle, constitue la résolution temporelle du modèle (Kouakou, 2011).

1.8.2. 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 supérieure 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. La plupart des techniques de réduction d'échelle ou « downscaling » sont à sens unique (la simulation avec les MCR n'envoie pas de rétroaction vers le MCG directeur) (Kouakou, 2011). Pour cette étude c'est le modèle climatique régional RCA4 de résolution $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ (soit 49km x49km) qui est utilisé. Ses sorties des données de climat futur proviennent de la phase 5 du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5).

1.8.3. 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. 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. 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. (Ardoin, 2004).

1.8.4. Description du projet CMIP

Le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP), ou *Coupled model Intercomparison Project* en anglais est un projet du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) (Taylor *et al.*, 2012; Boucher & Leconte, 2013). C'est un projet international proposant un protocole commun pour réaliser des simulations climatiques et mettre à disposition les résultats (Cattiaux, 2019). Il vise à réaliser des simulations climatiques de façon coordonnée entre les différents groupes de recherche. Cette démarche assure une meilleure estimation et une bonne compréhension des différences entre les modèles climatiques (Taylor *et al.*, 2012). Étroitement lié au GIEC, il participe largement à l'élaboration des rapports d'évaluation du changement climatique réalisés par ce groupement d'experts (Garcia, 2015). Il permet, en outre, d'estimer l'incertitude due à l'imperfection des modèles dans l'estimation du changement climatique lié à l'homme. La cinquième phase de ce projet (la plus récente achevée) a associé près de 20 centres climatiques du monde entier, et près de 50 modèles climatiques (Taylor *et al.*, 2012)

Le choix du projet CMIP5 est motivé pour sa grande utilisation pour les projections climatiques et la disponibilité des données en ligne.

Conclusion partielle

La zone choisie pour l'étude est le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré. Du point de vue morphologique, ce bassin est relativement peu accidenté dans l'ensemble. Il est généralement monotone à l'exception de la région de Man, dans l'Ouest, qui présente des reliefs importants. Cet environnement fait ressortir un réseau hydrographique dense avec diverses typologies. Le bassin versant de Sassandra à Soubré est soumis à trois régimes climatiques : régime équatorial de transition atténuée, régime tropical de transition atténué et régime de montagne. Ce bassin versant est couvert par deux grands types de végétation : un paysage de savane et un paysage forestier avec une végétation spécifique.

Après cette présentation des généralités sur la zone d'étude, nous abordons la deuxième partie consacrée aux matériels et aux méthodes.

PARTIE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

Cette partie présente les données disponibles et le matériel utilisé.

2.1.1. Données

2.1.1.1. Données d'observation

Les données utilisées sont de type climatologique et concernent les précipitations moyennes et les températures minimale et maximale. Ces variables climatiques sont toutes au pas de temps mensuel. Elles couvrent les périodes 1971 à 2010. Elles ont été fournies par la SODEXAM. Les stations sélectionnées sont au nombre de cinq (5) et se composent de trois (3) postes synoptiques et deux (2) postes pluviométriques (Tableau II). Elles sont spatialement bien réparties (Figure 8).

Tableau II : Stations météorologiques de la zone d'étude

Stations	Type de station	Latitude	Longitude	Période d'observation	Lacunes (Années)
Borotou	pluviométrique	8,46	-7,19	1971 - 2010	Sept 1999-Déc 1999
Daloa	synoptique	6,87	-6,47	1971 - 2010	---
Man	synoptique	7,40	-7,52	1971 - 2010	Sept 2002-Jan 2003
Odienné	synoptique	9,50	-7,57	1971 - 2010	Jan 2003-Mai 2003
Soubré	pluviométrique	8,27	-6,90	1971 - 2010	Juin 2000-Déc 2000

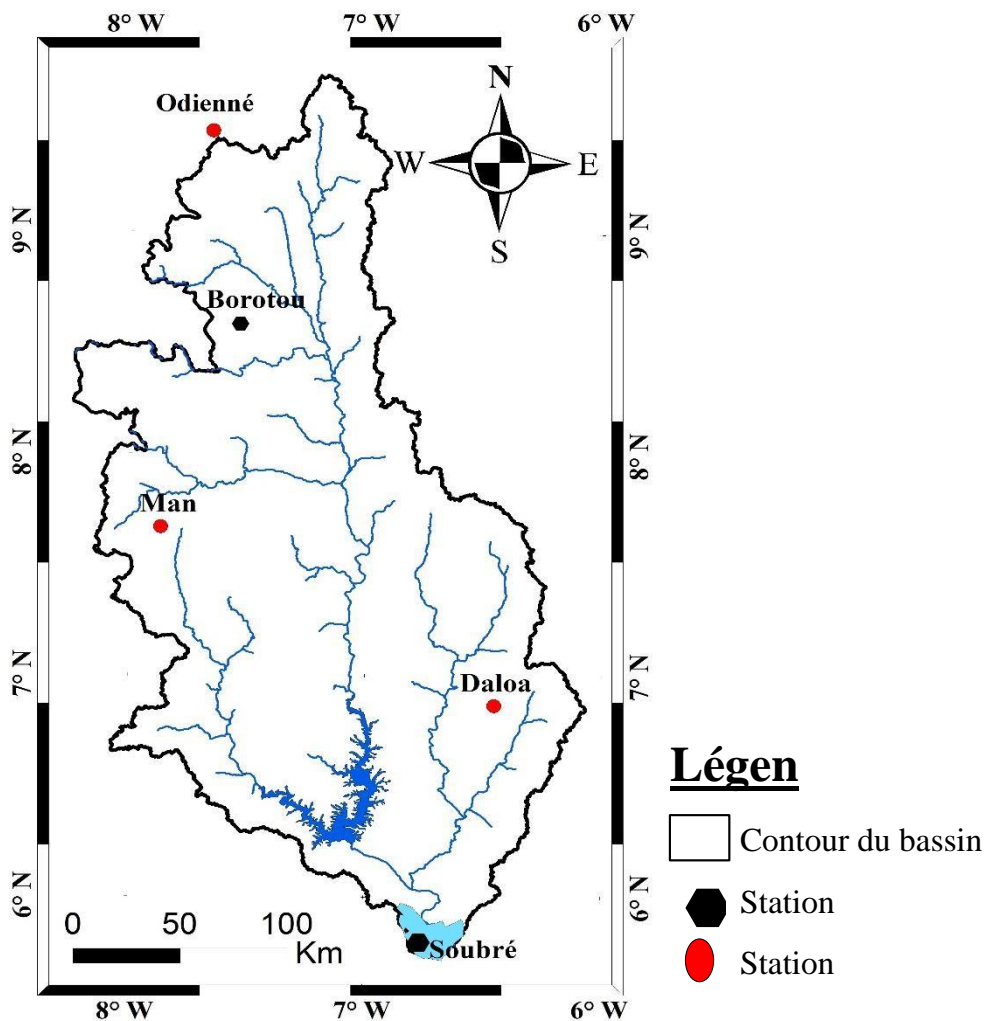


Figure 7 : Localisation spatiale des stations météorologiques

2.1.1.2. Données de simulation et de projection

Les données de simulation et de projection sont de type climatologique et concernent les précipitations moyennes et les températures minimales et maximales au pas de temps mensuel sur une période de 30 ans (1981-2010) pour les données de simulation et sur une période de 40 ans (2021-2060) pour les données de projection.

Elles ont été fournies par la quatrième version du modèle atmosphérique régional du Rossby Center (RCA4) et en fonction des scénarii RCP4.5 et RCP8.5 du projet CMIP5.

La moyenne des anomalies des précipitations et des températures simulées et projetées est disponible en téléchargement sur le site :

http://www.cccma.ec.gc.ca/cgi-bin/data/cgcm4_wb/get_netcdf_file_from_www_fre

2.1.1.3. Modèle numérique d'Altitude

Le modèle numérique d'altitude du bassin versant du fleuve Sassandra utilisé a une résolution spatiale de 90 m. Il est disponible sur le site internet : <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

2.1.2. Matériel de traitement des données

Les outils utilisés pour le traitement des données de l'étude sont :

- **ArcGis 10.5** : c'est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) d'ESRI (Environmental System Research Institute). Il a été utilisé dans ce travail pour le découpage de la zone d'étude, la création, l'habillage et l'édition des cartes thématiques ;
- **EXCEL** : c'est un logiciel tableur développé par Microsoft qui intègre des fonctions de calcul numérique, de représentations graphiques, d'analyse de données, etc. Ce logiciel a été utilisé pour les calculs numériques, les représentations graphiques, les analyses des données et les traitements statistiques ;
- **Google earth** : ce logiciel permet d'observer la plupart des régions du monde en vue du ciel et de zoomer, d'apprécier les détails. Il a permis dans ce travail à la visualisation de la zone d'étude. Il a été très utile dans localisation de certaines localités sur la zone d'étude ;
- **R Studio** : 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. Ce logiciel a été très utile dans la récupération des métadonnées provenant du projet CMIP5 et aussi dans le calcul des indices climatiques.

2.2. Méthodes

2.2.1. Critique et analyse des données pluviométriques

De la collecte jusqu'au traitement des données pluviométriques, des erreurs peuvent intervenir (erreurs liées aux instruments, erreurs liées à l'observateur, etc.). Il est donc judicieux d'analyser au préalable les données pluviométriques à notre disposition, afin de juger de leur qualité. Cela est essentiel pour arriver à une série continue de données. La méthode utilisée à cet effet est celle de la régression linéaire simple. Elle nous a permis de combler les différentes lacunes dans les séries de données de la période de 1971 à 2010.

2.2.2. Caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant du fleuve

Sassandra à Soubré

Pour caractériser la variabilité du climat, les méthodes utilisées sont celles du calcul des principaux paramètres statistiques (moyenne et écart type) et l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) pour déterminer la variabilité décennale et annuelle du climat respectivement. La méthode des fréquences est utilisée pour déterminer les séquences de sécheresse et la méthode des anomalies sera utilisée pour la comparaison des normales 1981-2010 et 1971-2000.

2.2.2.1. Méthodes de calcul des paramètres statistiques

L'analyse de la variabilité décennale du climat récent observé est faite à travers le calcul des principaux paramètres statistiques (moyenne et écart type) des différentes composantes, à savoir :

- ✚ les valeurs interannuelles ; ✚ les valeurs annuelles ; ✚ les valeurs mensuelles interannuelles.

L'analyse des tendances climatiques est faite par simple régression linéaire et par calcul de la différence relative entre décennie (équation 1). La période observée est divisée en trois décennies. Ainsi, la précipitation moyenne de la première décennie est P_{d1} , la précipitation moyenne de la deuxième décennie est P_{d2} et la précipitation moyenne de la troisième décennie est P_{d3} . On a

$$Dr_{ij} = \frac{P_i - P_j}{P_i} \times 100$$

Eq.(1)

2.2.2.2. Méthodes des indices climatiques

Les indices climatiques permettent d'analyser la variabilité climatique. Plusieurs indices ont été proposés tels que, l'indice de Nicholson (I), l'indice standardisé de précipitations (SPI), l'indice de pluviosité (IP) et l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) (Nicholson *et al.*, 1988; McKee *et al.*, 1993; Bergaoui & Alouini, 2001; Vicente *et al.*, 2010). Dans le cadre de cette étude, l'indice SPEI a été utilisé. Cet indice s'avère robuste que les autres car il corrige les insuffisances des autres indices en prenant en compte l'évapotranspiration potentielle donc la température (Vicente *et al.*, 2010).

Le calcul des SPEI nécessite une série chronologique de données de précipitations mensuelles ainsi que l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

✚ Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Plusieurs formules ont été proposées par des auteurs tels que Thornthwaite, Penman, Turc et Hargreaves pour évaluer l'ETP. Des quatre (4) lois évoquées, celle de Hargreaves est appliquée dans cette étude.

La formule de Hargreaves (Equation 2) exprime l'ETP (mm) en fonction de la température et latitude. Elle s'écrit :

$$ETP = 0,0023R(T_{mean} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

Eq.(2)

Où, Ra = équivalent en eau du rayonnement extraterrestre (mm jour^{-1}) ; T_{mean} = la température moyenne de l'air ($^{\circ}\text{C}$) ; T_{max} = température maximale de l'air ($^{\circ}\text{C}$) ; T_{min} = température minimale de l'air ($^{\circ}\text{C}$).

✚ Calcul de l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI)

Cet indice a été proposé par Vicente *et al.* (2010). Il prend en compte à la fois les précipitations et l'ETP (qui inclut la température) pour analyser les processus de sécheresse. Le SPEI permet d'analyser le processus de sécheresse sous-jacent (Rosni & Himayoun, 2019). Vicente *et al.* (2010) suggèrent une distribution logistique à trois paramètres pour le calcul des valeurs du SPEI. La distribution la mieux ajustée de la série de bilans hydriques climatiques (BHC) standardisés à toutes les échelles de temps est sélectionnée en utilisant le test des critères de Kolmogorov-Smirnov (Vicente *et al.*, 2010). Basée sur la distribution log-logistique à trois paramètres, l'équation 3 de probabilité distributive de la série de la BHC est exprimée comme suit :

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x+\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1}$$

Eq.(3)

où α est le paramètre de forme, β est le paramètre d'échelle et γ est le paramètre d'origine.

Le SPEI (équation 4) peut être obtenu sous la forme des valeurs normalisées de $F(x)$ comme suit :

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}$$

Eq.(4)

où

$$W = \sqrt{-2\ln(F(x))} \text{ pour } F(x) < 0,5 \text{ et}$$

$$W = \sqrt{-2\ln(1 - (x))} \text{ pour } F(x) > 0,5$$

Les paramètres C_0 , C_1 , C_2 , d_1 , d_2 , d_3 sont des constantes avec $C_0 = 2,51551$, $C_1 = 0,80285$, $C_2 = 0,01033$, $d_1 = 1,43279$, $d_2 = 0,18927$ et $d_3 = 0,00131$.

Les valeurs positives de SPEI indiquent les conditions d'humidité supérieures à la moyenne, tandis que les valeurs négatives indiquent les conditions de sécheresse. Un événement de sécheresse est défini lorsque la valeur de SPEI est inférieure ou égale à (-1) au cours d'une certaine période. Les catégories de sécheresse en fonction des valeurs de SPEI sont présentées dans le Tableau III.

Tableau III : Classification du degré de sécheresse et d'humidité en fonction des indices standardisés de précipitations et d'évapotranspiration (Bouly *et al.*, 2020)

Séquences de sécheresses	Valeurs SPEI	Séquences humides	Valeurs SPEI
Légèrement sèche	$0,00 \leq \text{SPEI} < -$	Légèrement humide	$0,00 \leq \text{SPEI} <$
Modérément sèche	$- \leq \text{SPEI} 0,99$	Modérément humide	$1,00 \leq \text{SPEI} 0,99$
Sévèrement sèche	$1,00 \leq \text{SPEI} < -$	Sévèrement humide	$1,50 \leq \text{SPEI} <$
Extrêmement sèche	$- < -2,00$	Extrêmement	$\text{SPEI} > 2,00$
	$1,50 < -$	humide	$<$
	$\text{SPEI} 1,99$		$1,99$

2.2.2.3. Fréquence des séquences de sécheresse

La fréquence cumulée (F) de sécheresse donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur la période d'étude. Elle est obtenue en faisant le rapport de l'effectif cumulé des séquences sèches par l'effectif total des années.

2.2.2.4. Méthode des anomalies

La comparaison des normales pluviométriques entre elles pour apprécier l'évolution des paramètres climatiques est faite par la méthode des anomalies. Le calcul est fait entre les séries observées de la période de référence 1981-2010 et les séries de la période 1971-2000.

Dans le cas des températures, l'anomalie est définie comme étant la différence en degré Celsius (°C) entre les données historiques et celles représentant la période de référence (équation 5).

Elle se traduit comme suit :

$$\delta T(^{\circ}C) = T_{obs}(^{\circ}C) - T_{hist}(^{\circ}C)$$

Eq.(5)

où :

T_{obs} : température de la période de référence (1981-2010) ;

T_{hist} : température de la période (1971-2000).

L'anomalie dans le cas des précipitations est définie comme le rapport de la différence des précipitations mensuelles interannuelles relatives aux deux normales pluviométriques sur celle des séries de données de la normale précédente. Elle s'exprime en pourcentage et son expression est donnée par l'équation 6 suivante:

$$\rho P(\%) = \frac{P_{obs} - P_{hist}}{P_{hist}} \times 100$$

Eq.(6)

P_{obs} : précipitations de la période de référence (1981-2010) ;

P_{hist} : précipitations de la période (1971-2000).

Une anomalie peut être positive pour indiquer une élévation du paramètre dans le futur et négative pour indiquer l'inverse (Chourghal *et al.*, 2018).

2.2.3. Caractérisation des changements climatiques aux horizons 2030 et 2050

La méthodologie utilisée passe par : (i) l'évaluation de la fiabilité des sorties du modèle, (ii) la correction des données de sortie du modèle (iii), l'évaluation de la corrélation entre les données corrigées et observées et (iv) analyse du changement climatique aux horizons 2030 et 2050.

2.2.3.1. Évaluation de la fiabilité des sorties du modèle climatique régional RCA4

La confiance dans la performance d'un modèle pour la production de scénarii climatiques futurs est élevée s'il est capable de reproduire correctement le climat présent. Ainsi, une comparaison est effectuée d'une part entre les données de températures observées et simulées par le modèle sur la période 1981-2010, et d'autre part, entre les données de précipitations observées et simulées sur la période 1981-2010. L'écart entre ces données observées et simulées constitue l'erreur commise par le modèle. Le calcul de l'erreur relative a été retenu comme critère numérique pour évaluer la performance du modèle RCA4. L'erreur relative (Er) permet de

savoir si le modèle climatique surestime ou sous-estime les paramètres recherchés l'Evapotranspiration (Mora *et al.*, 2014). Ce paramètre est estimé à travers l'équation 7.

$$Er = 100 \times \frac{(X_{cal} - X_{obs})}{X_{obs}} \quad \text{Eq.(7)}$$

avec : si $Er > 0$ le modèle surestime le paramètre calculé ; si $Er < 0$ le modèle sous-estime le paramètre calculé ;

X_{cal} : valeur du paramètre calculée par le modèle ; X_{obs} : valeur du paramètre observée.

La vérification de la performance du modèle a été réalisée par la comparaison graphique des données observées et simulées.

2.2.3.2. Correction des données de sortie du modèle

Les données de sortie de modèle climatique sont généralement biaisées. Ainsi avant d'utiliser ces données pour la modélisation climatique, elles sont corrigées. La méthode delta est celle adoptée dans cette étude. Cette approche est appliquée le plus souvent sur les variables climatiques en hydrologie, notamment la pluie, la température et l'Evapotranspiration (Mora *et al.*, 2014). Elle définit certains facteurs de correction en comparant les propriétés statistiques des variables simulées sur la période de référence aux observations historiques. Ces facteurs sont ainsi appliqués aux simulations climatiques pour corriger les erreurs. La méthode corrige deux types d'erreurs selon les équations 8 et 9 suivantes :

✚ Erreurs additives : pour les températures

$$T_{Scen,j,c} = T_{obs,j} + (T_{scen,m} - T_{ref,m,h}) \quad \text{Eq.(8)}$$

Où :

$T_{Scen,j,c}$: température journalière corrigée ;

$T_{obs,j}$: température journalière observée ;

$T_{scen,m}$: température moyenne mensuelle interannuelle de la période future ;

$T_{scen,m,h}$: température moyenne mensuelle interannuelle de la période référence.

✚ Erreurs multiplicatives : pour les précipitations

$$P_{scen,j,c} = P_{obs,j} \times \left(\frac{P_{scen,m,f}}{P_{ref,m}} \right)$$

Eq.(9) $P_{scen,j,h}$: pluie journalière corrigée ;

$P_{obs,j}$: pluie journalière observée ;

$P_{scen,m,f}$: pluie moyenne mensuelle interannuelle sur la période future ;

$P_{ref,m}$: pluie moyenne mensuelle interannuelle sur la période de référence.

2.2.3.3. Évaluation de la corrélation entre les données corrigées et observées

Le test de corrélation est utilisé pour évaluer une association (dépendance) entre deux variables.

Le calcul du coefficient de corrélation est effectué en utilisant différentes méthodes. Ce sont la corrélation r de Pearson, la corrélation tau « τ » de Kendall et le coefficient de corrélation rho « ρ » de Spearman. La première citée est utilisée dans ce travail car elle est la plus robuste.

La force d'association entre deux variables quantitatives peut être estimée par le coefficient de corrélation noté r . Il est égal au rapport de la covariance entre X et Y , divisé par le produit de leur écart-type S et varie entre -1 et +1. S'il est supérieur en valeur absolue à 0,8, la corrélation entre les deux variables peut être considérée comme importante ; entre 0,5 et 0,8 comme modérée ; entre 0,2 et 0,5 comme faible et très faible au-dessous. Un signe positif traduit une association « positive » : la valeur de Y croît avec celle de X . Une association « négative » : traduit l'inverse. L'hypothèse nécessaire à la validité de cette mesure est que la distribution de X et de Y soit conjointement normale. Son expression mathématique (équation 10) est la suivante :

$$r = \frac{S_{XY}^2}{S_X \cdot S_Y}$$

Eq.(10)

S_{XY}^2 est la covariance de X avec Y et S_X , S_Y sont les écart-types de chaque variable.

2.2.3.4. Analyse du changement climatique

L'analyse du changement climatique future s'appuie sur les méthodes des indices climatiques et celle des anomalies susmentionnées.

Conclusion partielle

Les données utilisées pour cette étude sont de deux types : les données climatiques et une donnée cartographique. Les premières regroupent les données météorologiques observées, simulées et projetées. La seconde donnée comprend une image satellitaire MNT et 4 outils ont été utilisés pour l'exploitation des différentes données.

PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats 3.1.1. Caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant du fleuve Sassandra

à Soubré

3.1.1.1. Analyse de la variabilité décennale de la période 1981-2010

La distribution temporelle des pluies annuelles suit globalement un gradient décroissant sur la période observée (1981-2010). Au cours de cette période, la précipitation moyenne annuelle calculée sur la première décennie (1981-1990) de la série est de 1 312,5 mm. Elle augmente significativement à 1 405,1 mm durant la deuxième décennie (1991-2000), soit un taux de 7 %.

Durant la troisième décennie, elle diminue considérablement de 13 %, pour atteindre la valeur de 1 220,6 mm, ce qui traduit la tendance légèrement à la baisse des précipitations sur la période 1981-2010 (Figure 8).

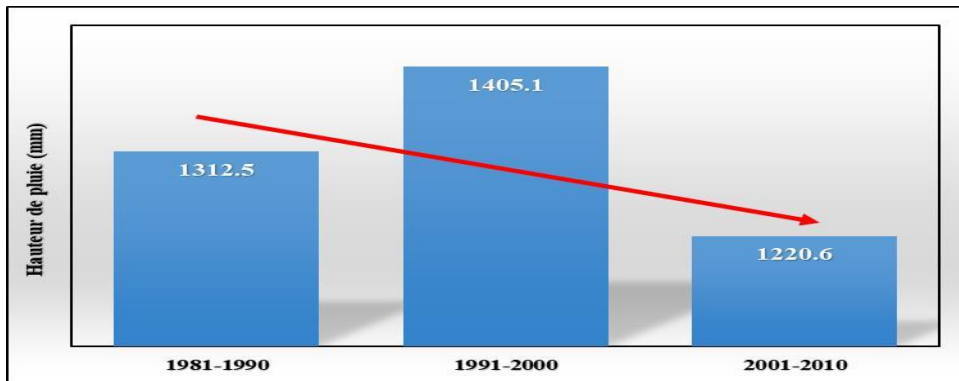


Figure 8 : Tendence des précipitations annuelles sur la période 1981-2010

Concernant les températures moyennes annuelles, l'analyse des tendances montre une augmentation moyenne de 0.5 °C sur les 30 années d'observation (1981-2010) (Figure 9). Elles passent de 25,3 °C durant la première décennie à 25,5 °C pour la seconde décennie. Au niveau de la troisième décennie, la température augmente à 25,9 °C.

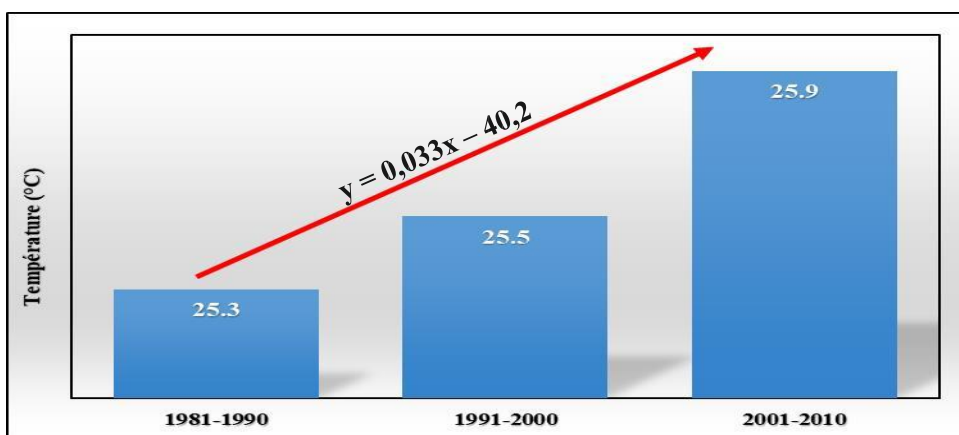


Figure 9 : Evolution des températures moyennes annuelles durant la période 1981-2010 sur le bassin du fleuve Sassandra à Soubré

3.1.1.2. Analyse de la variabilité annuelle du climat

Les séries de SPEI aux différentes stations synoptiques considérées ont permis de caractériser une variabilité saisonnière de la zone d'étude, matérialisée par une alternance d'années humides et sèches sur l'ensemble du bassin (Figure 10).

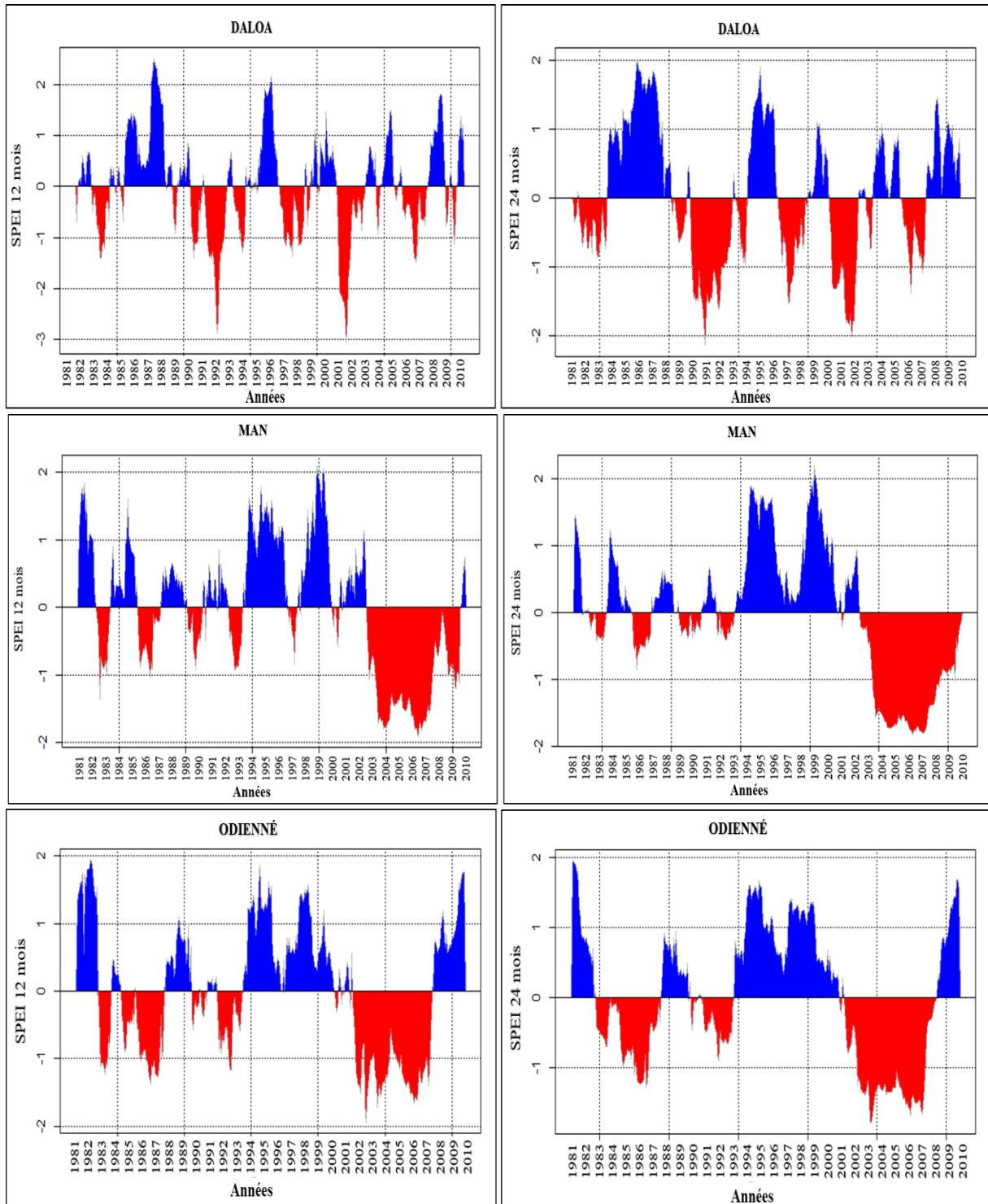


Figure 10 : Évolution temporelle des valeurs SPEI sur des échelles de temps 12 et 24 mois de 1981 à 2010 sur le bassin duassandra à Soubré

Cette alternance se présente comme suit :

- à Daloa on enregistre trois périodes : une période très humide (1981-1988) avec des valeurs de SPEI supérieures ou égales à 1,5. Elle est suivie d'une période extrêmement sèche (1989-1994) (SPEI inférieur à -2). Enfin la période 1995-2010, est marquée par une alternance d'années sèches et d'années humides avec un pas de temps de 1 à 2 années. Néanmoins, on observe une tendance légèrement sèche sur la période de l'étude.
- à Man, la variabilité climatique commence par une grande période humide d'environ 20 ans, interrompue par des années sèches dont les plus importantes sont 1983, 1987 et 1993. Ensuite vient une succession d'années de sécheresse sévère jusqu'à 2010.
- à Odienné, on enregistre deux périodes modérément sèches (1981-1993 et 2002-2010). Ces périodes sont interrompues par des années humides (1981, 1982, 1988 et 1989) et une période humide d'environ 8 ans qui part de 1994 à 2001.

3.1.1.3. Fréquence des séquences de sécheresse météorologique

L'analyse de la fréquence des épisodes de sécheresse observée aux différents domaines climatiques du bassin versant du Sassandra (Figure 11) montre qu'elle est différente d'une zone à l'autre. Le régime tropical de transition atténué (Odienné) semble le plus affecté par les séquences de sécheresse (50 %) avec une intensité élevée alors que dans les autres régimes (équatorial de transition atténué et de montagne), les intensités sont modérées avec des fréquences respectivement de 47 % et 43 %.

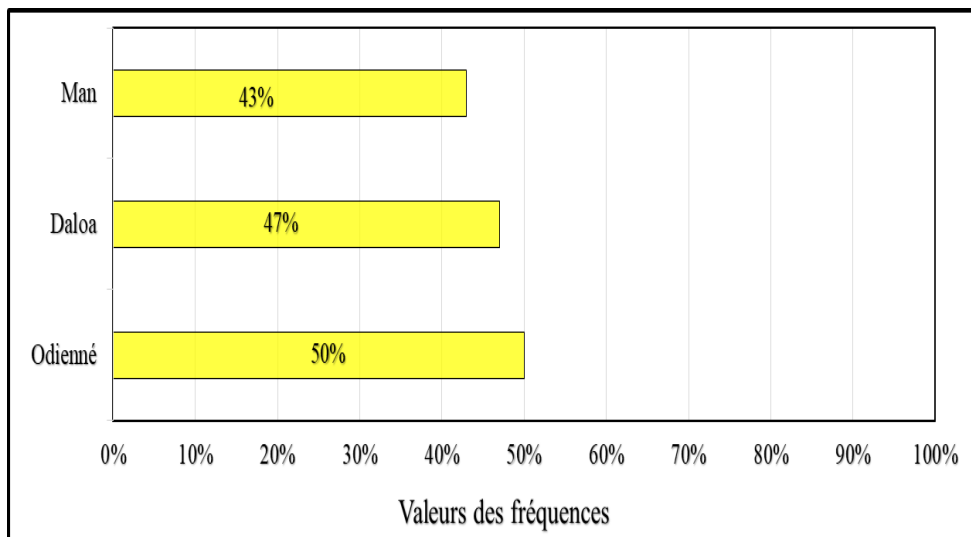


Figure 11 : Fréquences des séquences de sécheresse (1981-2010)

3.1.1.4. Comparaison des normales 1981-2010 et 1971-2000

Le climat de la période de référence (1981-2010) est caractérisé par une augmentation moyenne mensuelle des températures de 0,3 °C et une baisse moyenne des précipitations de 6 %. Cette

dernière atteint 16 % en décembre par rapport à la période 1971-2000 en général sur l'ensemble du bassin (Figure 12).

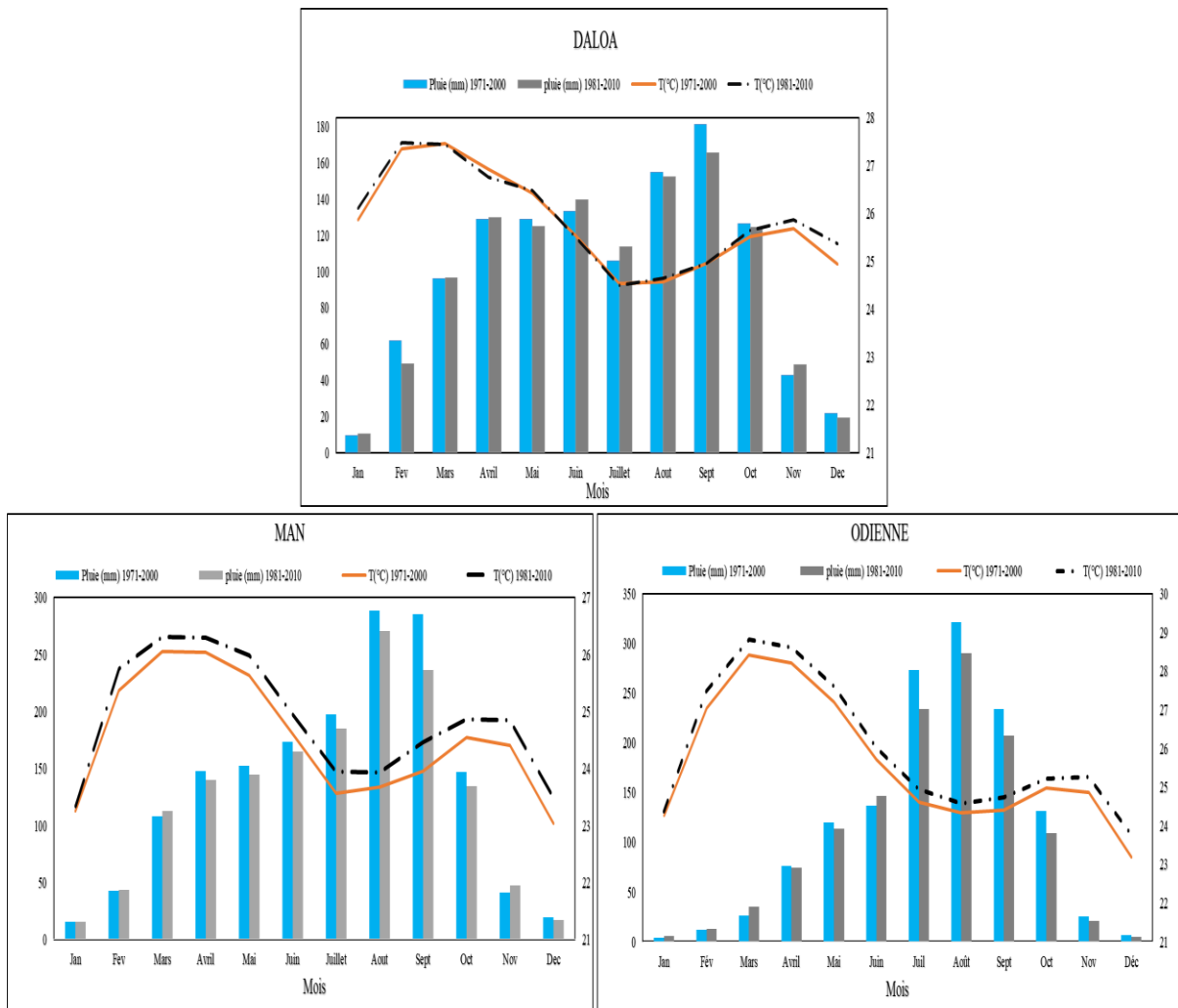


Figure 12 : Précipitations et temp ératures moyennes mensuelles du climat observé sur les périodes 1971-2000 et 1981-2010 sur le bassin du Sassandra à Soubré

La détection de ce changement est basée sur la méthode des anomalies. De façon spécifique, ces tendances se présentent comme suit :

- à Daloa on observe une légère diminution des précipitations avec une moyenne de 1 %. Les températures enregistrent une augmentation de 0,1 °C en moyenne. Néanmoins les mois de mars, juin, juillet et septembre de la période de référence ont une variation quasiment nulle comparée à la normale 1971-2000, ce qui traduit l'allure similaire des deux courbes de températures.
- à Man la variation de la pluviométrie est plus marquée que sur l'ensemble du bassin avec une décroissance des hauteurs de pluie à 7 % en moyenne. Cette chute atteint ses plus bas niveaux aux mois de septembre, octobre et décembre avec respectivement 17 %, 9 % et 12 %. Seuls les mois de janvier, février, mars et novembre enregistrent une

augmentation des précipitations. Les températures sont quasi-identiques sur les deux périodes.

- la zone d'Odienné n'est pas en marge de cette récession pluviométrique qui prévaut sur l'ensemble du bassin, elle enregistre une tendance à la baisse la plus marquée du bassin avec une moyenne de 8 %. La baisse est minimale en avril (2 %) et maximale en décembre (31 %). Le réchauffement moyen de la zone est de 0,4 °C.

3.1.2. Caractérisation des changements climatiques aux horizons 2030 et 2050 du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré

3.1.2.1. Fiabilité des précipitations et températures du modèle climatique RCA4

✚ Précipitations

Les erreurs de sorties du modèle climatique régional (MCR) RCA4 sur les données de pluie simulées ont été évaluées sur la période 1981-2010. Sur l'ensemble des mois de l'année, le modèle suit parfaitement la tendance des données observées à l'exception des mois d'août et septembre où les allures divergent légèrement. Néanmoins, les précipitations simulées sont nettement inférieures aux précipitations observées de la période de référence (Figure 13).

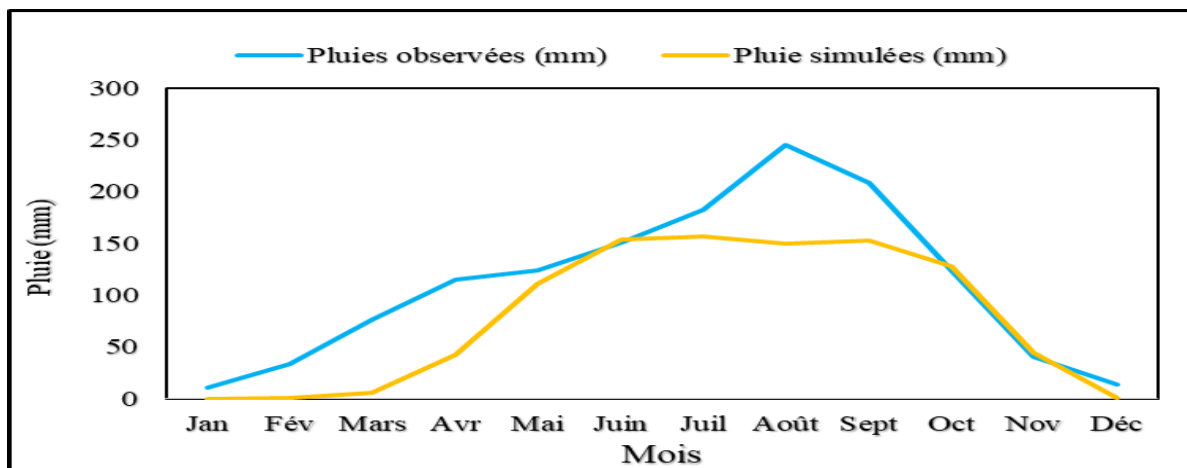


Figure 13 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées (sur le bassin) sur la période 1981-2010

✚ Températures minimales et maximales

Le modèle RCA4 représente fidèlement la tendance des données observées. Contrairement à la pluie où les écarts entre données observées et données simulées par le modèle climatique régional RCA4 sont importants, les écarts entre les données de températures simulées et les données de températures observées sont nettement moins importants (Figure 14). Le modèle surestime les températures minimales sur l'ensemble des mois avec des écarts allant à plus de 5

°C pour les mois de février, mars et avril. Contrairement aux températures minimales, les températures maximales sont bien plus basses que celles observées. Cette erreur d'estimation se ressent particulièrement pendant les mois de juillet, août, et septembre où les écarts avoisinent (-7 °C).

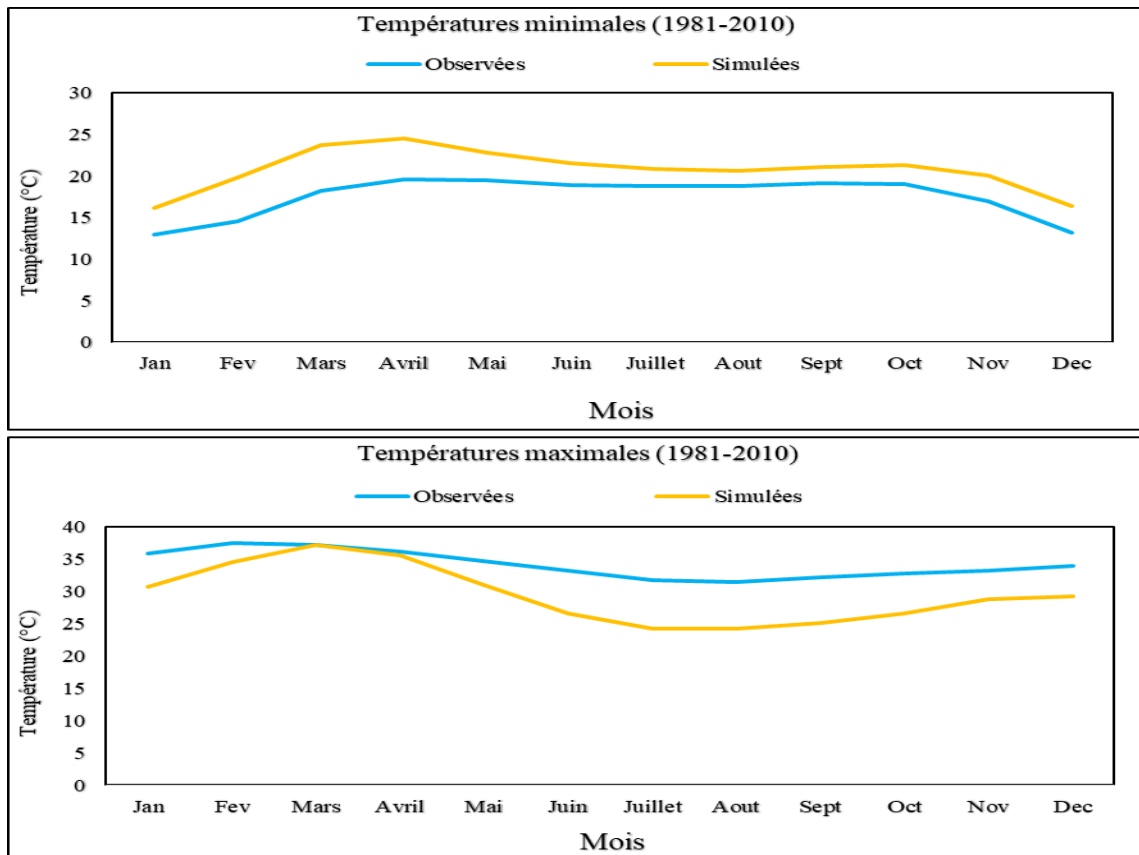


Figure 14 : Comparaison des températures minimales et maximales interannuelles observées et simulées et sur la période de référence (1981-2010)

3.1.2.2. Évaluation de la corrélation entre les données simulées et observées

✚ Précipitations

Nous observons une bonne corrélation (0,99) entre les données de précipitations simulées et les données observées sur la période de référence (Figure 15).

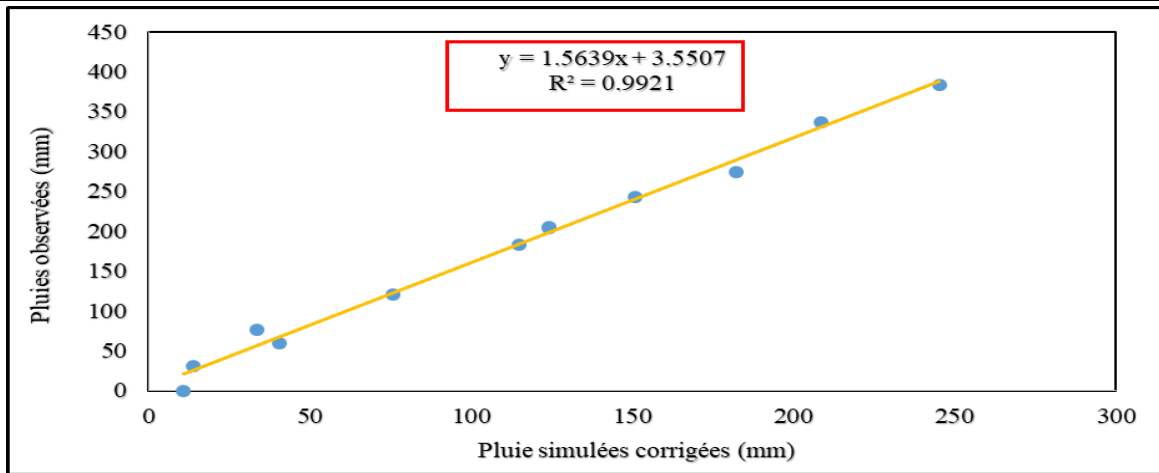


Figure 15 : Corrélation entre les précipitations observées et corrigées

✚ Température

La figure 16 montre la corrélation entre les températures observées et les températures simulées corrigées. Les corrélations entre températures minimales et maximales observées et celles simulées sont supérieures à 0,70 ce qui traduit une bonne corrélation de celles-ci.

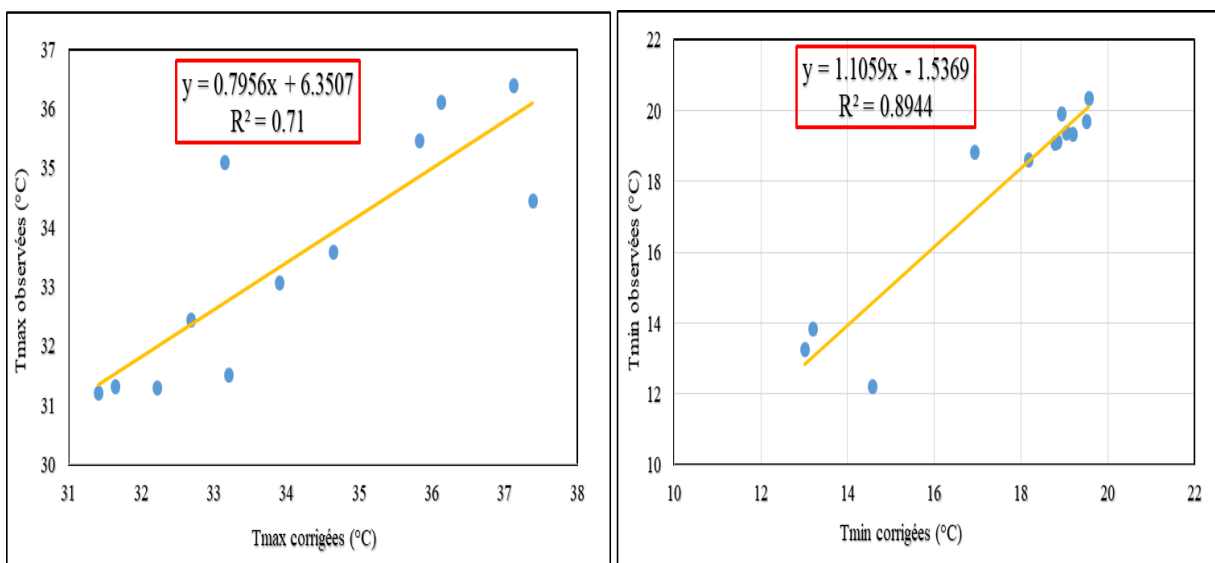


Figure 16 : Corrélation entre température observées et corrigées sur la période 1981-2010

3.1.2.3. Analyse de la variabilité saisonnière

La figure 17 présente les indices SPEI sur la zone d'étude, dans le cas du scénario RCP4.5 dit « réaliste », pour les périodes 2021-2040 et 2041-2060. On observe une alternance de saisons sèche et humide sur tout le bassin. Elle se présente comme suit :

- aux stations de Daloa et Man pour la période 2021-2040, nous enregistrons deux grandes périodes distinctes. La première période de 10 ans (2021-2030) est sévèrement humide. La deuxième période allant de 2031 à 2040 est une période sévèrement sèche. Cette

tendance à la sécheresse est observée sur les quinze premières années de l'horizon 2050 (2041-2055). Elle est interrompue par une période humide de 5 ans (2045 à 2049). Les dernières années de cette période sont marquées par une recrudescence des précipitations (période humide).

- à la station d'Odienné, trois périodes se dégagent : d'abord la période 2021-2030 est une période modérément humide puis suivie de la période 2031-2037 qui est modérément sèche et enfin la période 2038-2040 qui est une période extrêmement humide.

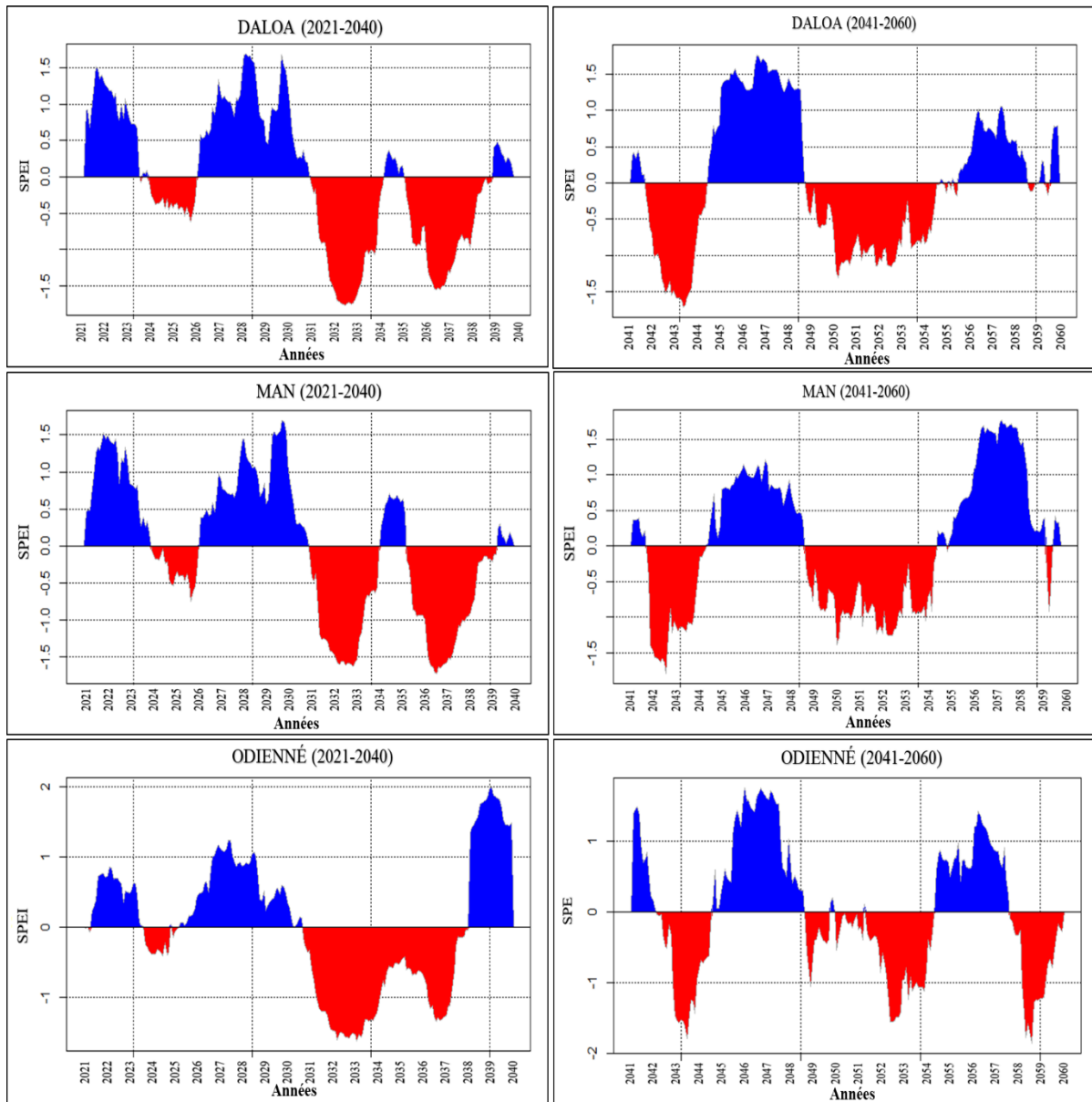


Figure 17 : Variation temporelle des valeurs SPEI des périodes 2021-2040 et 2041 à 2060 dans le cas du scénario RCP4.5 sur le bassin duassandra à Soubré
 Dans le cas du scénario RCP8.5 dit « pessimiste », pour les périodes 2021-2040 et 2041-2060, les projections des précipitations et des températures ont permis de calculer les indices SPEI. Comme l'illustre la figure 18, on observe une alternance de périodes humides et sèches au niveau des trois régions climatiques du bassin. L'analyse de ces graphiques fournit les résultats presque

similaires liés à la variabilité et aux tendances à la sécheresse pour la période 2021-2040. Les SPEI les plus bas ont été enregistrés à Daloa entre 2034 et 2035 avec une valeur inférieure à -2 (extrêmement sèche). Pour la période 2041-2060, les séquences sèches sont extrêmes avec des valeurs de SPEI inférieures à (-2) dans les villes de Daloa et Man. Contrairement aux périodes sèches, les périodes humides sont modérées à Daloa et Man et sévères à Odienné. Néanmoins une reprise des précipitations est observée sur l'ensemble du bassin à la fin de cette période (2041- 2060).

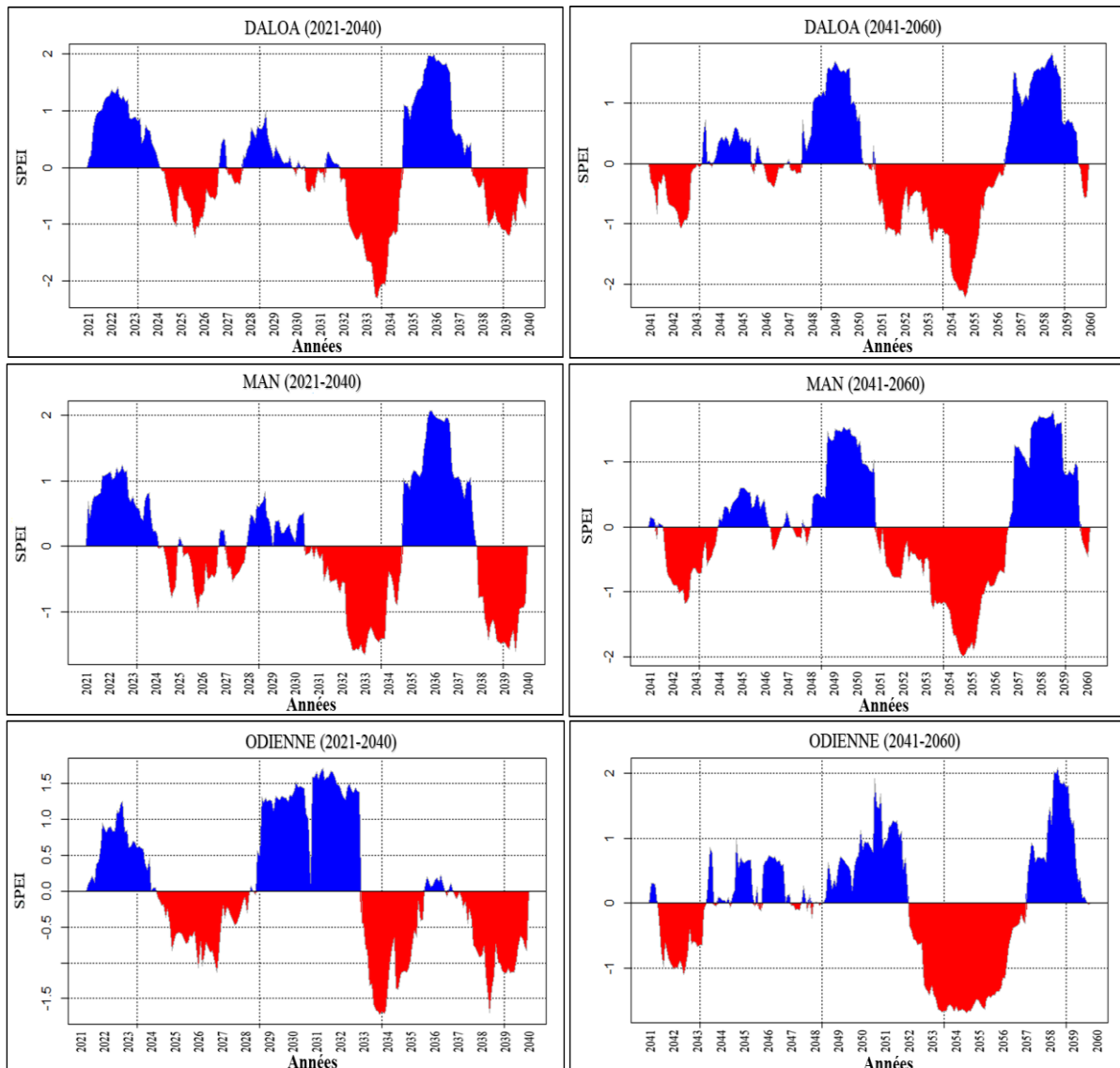


Figure 18 : Variation temporelle des valeurs SPEI des périodes 2021-2040 et 2041 à 2060 dans le cas du scénario RCP8.5 sur le bassin du Sassandra à Soubré

3.1.2.4. Comparaison entre précipitations de la période 1981-2010 et précipitations des horizons futurs (2030 et 2050)

Pluviométrie

L'analyse de la pluie moyenne simulée par le modèle climatique régional RCA4 aux horizons 2030 et 2050 montre une différence entre les précipitations moyennes mensuelles observées sur la période de référence 1981-2010 et celles-ci. Cette différence entre les données simulées par le modèle constitue le taux de croissance ou de décroissance des précipitations sur le bassin du fleuve Sassandra à Soubré.

La pluviométrie moyenne annuelle observée sur la période de référence (1981-2010) sur la zone d'étude est de 1 312,3 mm/an. Elle passe à 1 331,9 mm/an à l'horizon 2021-2040 suivant le scénario RCP4.5, et à 1 821,5 mm/an avec le scénario RCP8.5. La comparaison entre les précipitations moyennes annuelles observées et simulées par le modèle climatique régional RCA4 montre une hausse des précipitations de 1 % (soit 8 mm) à l'horizon 2021-2040 pour le scénario RCP 4.5 et une hausse de 38 % (soit 497 mm) sur le même horizon pour le scénario RCP8.5. À l'horizon 2041-2060 les précipitations moyennes annuelles seraient de 1 310,3 mm/an et 1 841,1 mm/an respectivement suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. À cet horizon, le modèle RCA4 prévoit une légère baisse de 1 % soit 7 à 14 mm des précipitations moyennes annuelles pour le scénario RCP4.5 et une hausse de 39 % (516,8 mm) des hauteurs de pluies pour le scénario RCP8.5 (Figure 19).

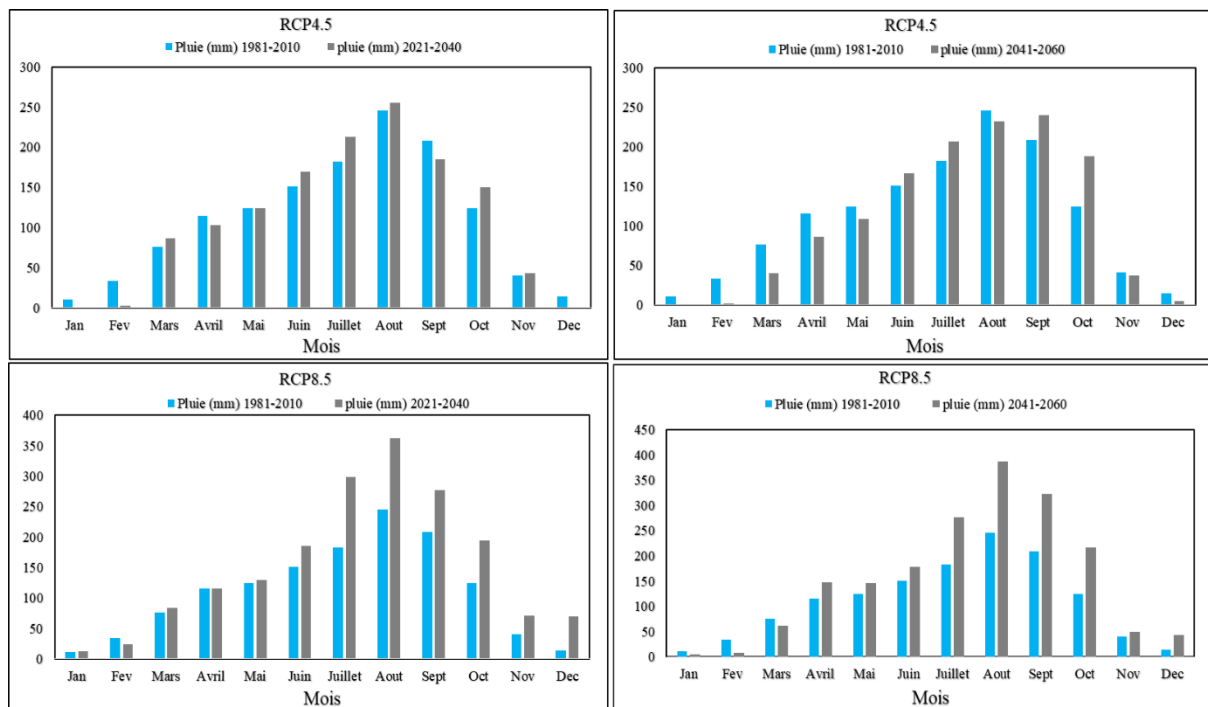


Figure 19 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles interannuelles observées sur le bassin et projetées à l'horizon 2030 et 2050

📊 Température

La comparaison entre les températures minimale et maximale observées sur la période 1981-2010 et celles simulées et corrigées sur les périodes 2021-2040 (horizon 2030) et 2041-2060 (horizon 2050) montre des différences significatives (Figure 20)

Les températures minimales suivant le scénario RCP4.5 connaîtraient une hausse moyenne annuelle de 1,4 °C et 1,8 °C respectivement aux horizons 2030 et 2050 par rapport à la moyenne annuelle observée sur la période de référence (1981-2010). Suivant le scénario RCP8.5, le modèle prévoit également une hausse des températures minimales de 1,4 °C et 2,3 °C aux horizons 2030 et 2050 sur le bassin versant (Figure 20). Cependant, la hausse des températures minimales à l’horizon 2050 est plus significative suivant le scénario RCP8.5 (2,3 °C) que celle suivant le scénario RCP4.5 (1,8 °C).

Concernant les températures maximales, elles connaîtraient une hausse moyenne annuelle de 1,5 °C et 1,4 °C à l’horizon 2030 suivant respectivement les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. À l’horizon 2050, le modèle prévoit une augmentation de 1,8 °C suivant le scénario RCP4.5 et de 2,6 °C suivant le scénario RCP8.5 (Figure 21). Cette augmentation de la chaleur serait plus significative, suivant le scénario RCP4.5 à l’horizon 2030 et suivant RCP8.5 à l’horizon 2050.

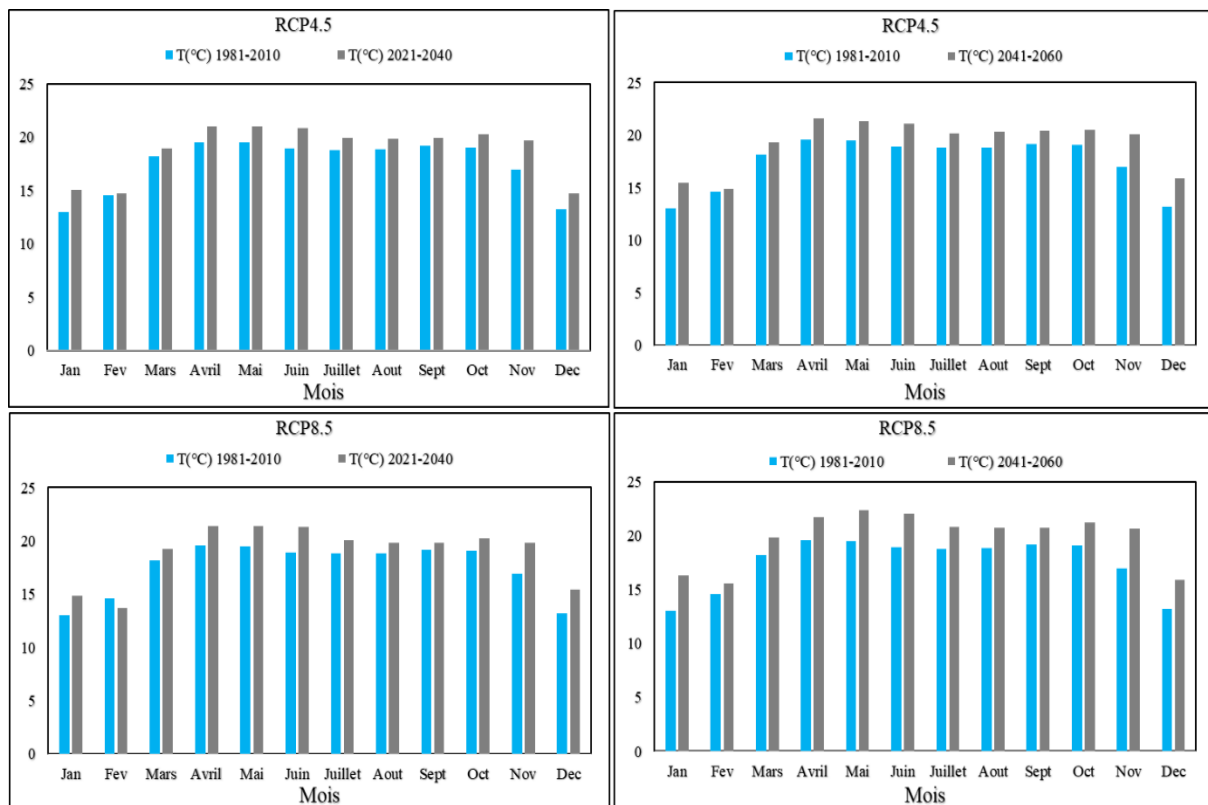


Figure 20 : Variation moyenne mensuelle des températures minimales interannuelles sur le bassin du Sassandra à Soubré aux horizons 2030 et 2050

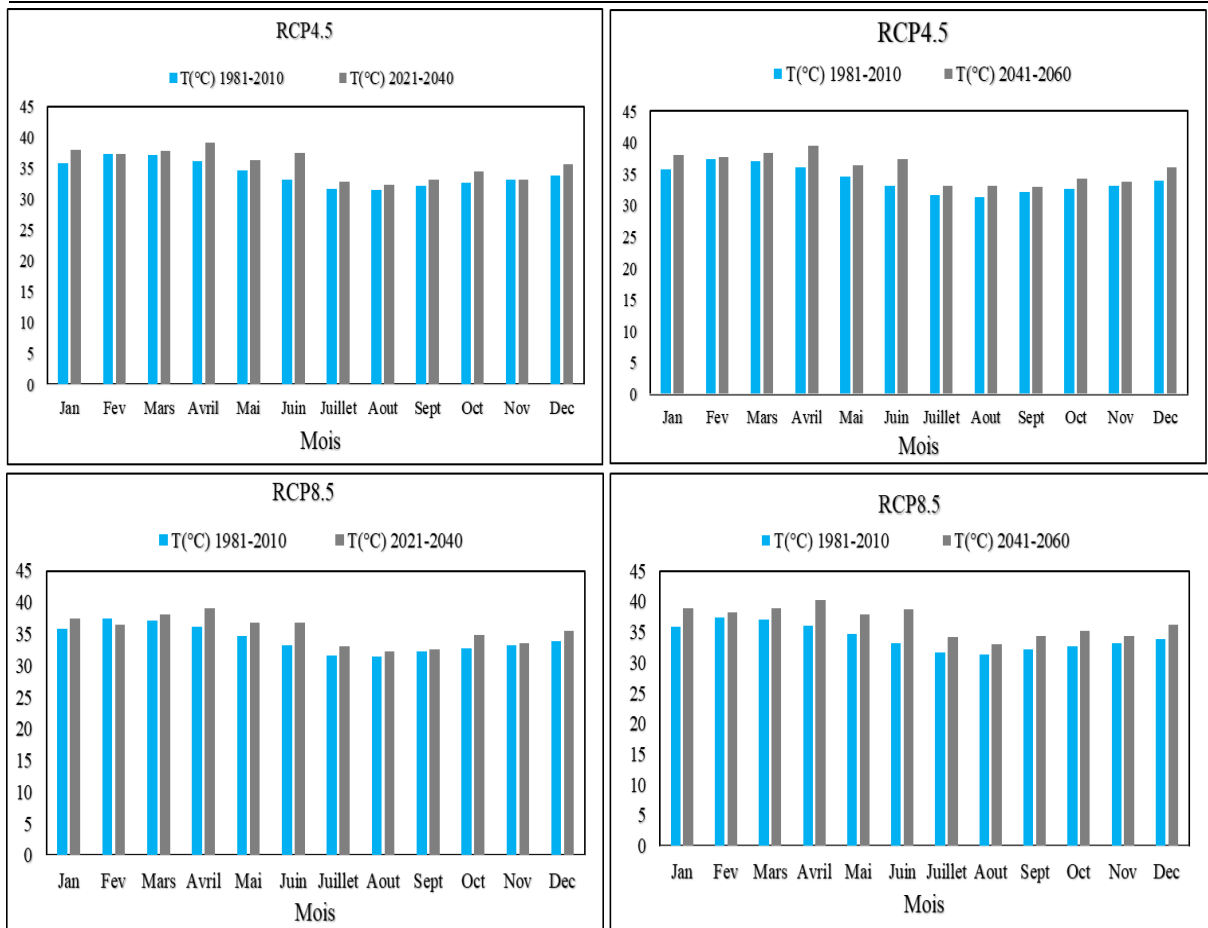


Figure 21 : Variation moyenne mensuelle des températures maximales interannuelles sur le bassin duassandra à Soubré aux horizons 2030 et 2050

3.2. Discussion

Précipitation

L'étude de la variabilité climatique sur le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré a révélé des changements (baisse des hauteurs de précipitation, hausse des températures etc.) qui ont eu lieu sur la période 1981-2010. En effet, tous les bassins versants de Côte d'Ivoire ont subi des modifications climatiques au cours de leur évolution (Goula *et al.*, 2009).

Les résultats de la caractérisation des séries chronologiques permettent de souligner une modification du régime des précipitations et des températures. Une modification qui se caractérise par une diminution des hauteurs annuelles de précipitations et une augmentation des températures. Ces perturbations sont accentuées dans le nord du bassin versant. Ces résultats concordent avec ceux de Brou *et al.* (2005) qui notent une diminution des précipitations depuis la fin des années 1960 en Côte d'Ivoire et sur l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest.

Selon ces auteurs la baisse des précipitations s'est amorcée, en Côte d'Ivoire comme dans les autres pays du golfe de Guinée dès la fin des années 1960, en phase avec ce qui a été observé dans le Sahel. Cette dernière s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 avant de connaître une légère rémission dans les années 2000. En effet, on relève sur la zone d'étude d'importantes séquences de sécheresse surtout dans la partie nord du bassin versant. Cela pourrait être lié à l'inégale distribution spatiale de la pluie qui diminue du Sud vers le Nord du bassin versant.

L'analyse de l'indice standardisé des précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) appliqué aux précipitations de la période de référence 1981-2010 a permis de mettre en évidence deux types de période sur l'ensemble du bassin. Une première période humide couvre la séquence 1981-1990. Une seconde période qui couvre la séquence 1991-2010, relativement sèche apparaît sur l'ensemble du bassin versant. Ces résultats ont une bonne similitude avec la plupart des études menées en Afrique de l'Ouest en générale et en Côte d'Ivoire en particulier par Aké (2010) et Kouakou (2011).

Faiblesses, incertitudes et performances du modèle

Les différents tests statistiques appliqués sur les données provenant du modèle climatique régional RCA4 ont permis de montrer l'efficacité du modèle. Ces faiblesses sont à la fois qualitatives et quantitatives.

Les faiblesses et incertitudes d'ordre qualitatif du modèle se traduisent par les biais dans les séries de données projetées par rapport aux données observées. Concernant l'aspect d'ordre qualitatif nous notons des écarts entre les données simulées et observées. En effet le modèle surestime les températures minimales et sous-estime les températures maximales avec des erreurs relativement de 3,3 °C et -4,7 °C respectivement. Les précipitations quant à elles sont aussi sous-estimées par le modèle (-29 %). Ces faibles incertitudes sur les températures s'expliquent par le fait qu'en absence de relief fortement accidenté, les températures ont une variabilité spatiale relativement homogène (Kouakou, 2011). La performance de ce modèle réside en sa capacité de simuler parfaitement les saisons qui prévalent sur le bassin versant. Elle se traduit aussi par de significatives corrélations entre les précipitations moyennes observées et simulées ($R^2 = 0,99$), et les températures minimales et maximales observées et simulées ($R^2 = 0,89$ et $0,71$ respectivement). Selon Kouakou (2011) la performance d'un modèle est due à la paramétrisation des phénomènes physiques tels que les précipitations convectives, les conditions aux limites et les états de surface.

Précipitations futures

La simulation du climat futur selon le scénario RCP4.5 montre une hausse de 1 % sur la période 2021-2040 et une baisse de 1 % sur la période 2041-2060 sur l'ensemble du bassin. Contrairement au scénario RCP4.5 le scénario RCP8.5 lui prévoit une hausse des précipitations avec un taux supérieur à 35 % sur les deux horizons (2030 et 2050). En effet, le taux de variation des quantités de pluie est fonction des différents « futurs possibles » et dépend des hypothèses relatives aux scénarios d'émissions (Kouakou, 2011). En plus, les précipitations restent la variable climatique la plus difficile à projeter, surtout dans le contexte Ouest-africain, qui est marqué par de fortes variabilités intra et interannuelles. Les modèles climatiques ne convergent pas tous sur les tendances futures des précipitations en Afrique de l'Ouest (Noblet *et al.*, 2018)

Températures futures

La projection des conditions climatiques sous les scénarii d'émission RCP4.5 et RCP8.5 sur deux fenêtres du 21^{ème} siècle, 2021-2040 (horizon 2030) et 2041-2060 (horizon 2050), a permis de déterminer les tendances climatiques qui prévaudront sur la zone d'étude. Les résultats de la comparaison entre les données de températures (minimales et maximales) observées et celles simulées ont mis en évidence les évolutions temporelles d'anomalies de température. Le modèle prévoit une augmentation des températures minimales de 1,4 °C et 1,8 °C

respectivement à l'horizon 2030 et 2050 avec le scénario d'émission RCP4.5. Cette augmentation a été également observée avec le scénario d'émission RCP8.5 qui met en évidence une hausse des températures minimales, de 1,4 °C pour la période 2021-2040 et 2,3 °C pour la période 2041-2060. Aussi le modèle prévoit une hausse des températures maximales de 1,5 °C et 1,8 °C respectivement à l'horizon 2030 et 2050 suivant le scénario RCP4.5. Avec le scénario RCP8.5 on enregistre une augmentation de 1,4 °C et 2,6 °C respectivement aux horizons 2030 et 2050 sur la zone d'étude. Ces augmentations de température ont été constatées dans les bassins de la Comoé et de Sassandra (Kouakou, 2011; Yéo, 2017; Coulibaly *et al.*, 2018).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion et perspectives

Cette étude s'est intéressée à la caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin du fleuve Sassandra à Soubré. Pour y parvenir, ce travail s'est fixé deux objectifs. Le premier a consisté à caractériser la variabilité climatique du bassin. Le second s'est intéressé à la

caractériser les changements climatiques aux horizons 2030 et 2050 à travers deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) provenant du modèle climatique RCA4.

L'analyse de la variabilité pluviométrique a montré une récession pluviométrique sur la période 1981-2010 en comparaison avec la normale précédente (1971-2000). Ce déficit pluviométrique (6 %) est accompagné d'une hausse des températures, favorisant ainsi une expansion de la sécheresse sur l'ensemble du bassin du fleuve Sassandra à Soubré et ce depuis les années 1971. Des trois régions climatiques du bassin, le climat tropical de transition (région d'Odienné) semble être le plus touché par cette variabilité climatique avec un taux de variation moyen des précipitations de -8 % et une augmentation des températures de 0,4 °C par an. On note également une alternance de périodes sèches et humides. Les périodes les plus humides se situent entre 1981 et 2000 avec une intensité modérée. Les années 2001 à 2010 sont quant à elles marquées par une sécheresse sévère sur tout le bassin avec des indices pluviométriques inférieurs à -1,99 par endroit. Les périodes sèches ont une fréquence d'occurrence plus élevée en climat tropical de transition (région d'Odienné) au Nord du bassin suivie en deuxième position du climat équatorial atténué (région de Daloa au Centre), enfin du climat de montagne (région de Man à l'Ouest). Cependant, malgré ces fluctuations pluviométriques, les régimes saisonniers restent inchangés.

La simulation du climat futur a été faite avec le modèle RCA4 en fonction des scénarii d'émission des gaz à effet de serre RCP4.5 dit optimiste et RCP8.5 dit pessimiste. Les résultats se présentent comme suit :

- la comparaison entre les données simulées sur les périodes 2021-2040 et 2041-2060 et celles observées sur la période de référence (1981-2010) montrent des changements significatifs des paramètres climatiques futurs ;
- une hausse des températures minimales de 1,4 °C et 1,8 °C respectivement sur les périodes 2021-2040 et 2041- 2060 sous le scénario RCP4.5 ;
- une augmentation de 1,4 °C à 2,3 °C des températures minimales aux mêmes horizons sous le scénario RCP8.5;
- une augmentation de 1,5 °C et 1,8 °C sous le scénario RCP4.5 aux horizons 2030 et 2050 ;

Conclusion et perspectives

- une augmentation de 1,4 °C et 2,6 °C des températures maximales aux horizons 2030 et 2050 sous le scénario RCP8.5.

S'agissant des précipitations annuelles, on note une tendance à la hausse de 1 % sur la période 2021-2040 et une tendance à la baisse également de 1 % sur la période 2041-2060 sur l'ensemble du bassin pour le scénario RCP4.5. Le scénario RCP8.5 lui prévoit une hausse des précipitations avec des taux supérieurs à 35 % sur les deux horizons futurs (2030 et 2050).

Au terme de cette étude, nous préconisons pour une meilleure connaissance de la dynamique climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré, dans une perspective d'étude de faire :

- ✚ la prise en compte des autres paramètres climatiques tels que : l'humidité relative, la radiation solaire afin de mieux appréhender les effets de la variabilité climatique ;
- ✚ l'utilisation de plusieurs modèles climatiques régionaux couplés pour mieux approcher les valeurs des paramètres climatiques sur le bassin du fleuve Sassandra ;
- ✚ l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et sur la production d'électricité aux barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré à l'aide de modèle distribué.

RÉFÉRENCES

- Adja M.G. (2009). Etude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Département de Boundiali et Tengrela (milieux soudano-sahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 184 p.
- Agbri L., Bamba S., Doumouya I. & Savane I. (2010). Bilan des flux de matières particulaires et dissoutes du Sassandra à Gaoulou pont (Côte d'Ivoire). *Sciences & Nature*, 7(2): 107–118.
- Aké G.E. (2010). Impact de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 208 p.
- Anoh K.A. (2014). Apport d'un SIG et du modèle Agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 162 p.

- Anoh K.A., Koua T.J., Kouamé K.J., Jourda J.P. & Laurent F. (2017). Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using SWAT: a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*: 157-167.
- Ardoin B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (France), 440 p.
- Bergaoui & Alouini (2001). Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant du Silinia en Tunisie. *Sécheresse*, 12(4): 205–213.
- Bonnard V. (2016). Application d'une méthodologie pour l'analyse des concentrations de polluants issues de la modélisation inter-régionale Esméralda sur la Bourgogne en 2005. Mémoire de Master, Université de Bourgogne (France), 40 p.
- Boucher M.-A. & Leconte R. (2013). Changements climatiques et production hydroélectrique canadienne: où en sommes-nous? *Canadian Water Resources Journal*, 38(3): 196–209.
- 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.
- Bouly S., Cisse A., Faye C. & Sane T. (2020). Utilisation de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 à 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la BASSE CASAMANCE. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 32: 107-133
- Brou Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Thèse De Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille (Lille, France), 212 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): 533-540.
- Camus H. (1969). Hydrologie du bassin du Sassandra. Adiopodoumé: ORSTOM, 61 p.
- Cattiaux J. (2019). Modélisation et variabilité interne. *Centre National de Recherches Météorologiques* : 72 p.
- Chourghal N., Huhard F., Boukhalifa H., & Belhamra M., (2018).Le climat recent observé et les changements climatiques futurs dans la région de Bordj Bou Arreridj. *Courrier du Savoir*, 26 :585-592
- Coulibaly N., Coulibaly T.J.H., Mpakama Z. & Savané I. (2018). The impacts of climate change on water resource availability in trans-boundary basin in West Africa: the case of Sassandra. *Journal of hydrology*, 5(1): 13 p.
- Djè K.B. (2014). Programme national changement climatique (PNCC). Document de stratégie du programme national changement climatique (2015-2020), Côte d'Ivoire, 71 p.
- Garcia L. (2015). Impact du changement climatique sur les rendements du mil et de l'arachide au Sénégal. Mémoire de Master, Université de Montpellier II (France), 55 p.

- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse, 103 p.
- 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., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2005). Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire. *Poster AOC, Séminaire International*: 5–36.
- Goula B.T.A., Kouassi W.F., Fadika V., Kouakou K.E. & Savané I. (2009). Impacts du changement climatique et de la variabilité climatique sur les eaux souterraines en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Comoé. *International Association of Hydrological Sciences*, 334: 190–202.
- Goula B.T.A., Savané I., 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. *Vertigo*, (1): 12 p.
- Jourda J.P. (2009). Etude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables, 70 p.
- Konan B. (2001). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra à Soubre. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 182 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 d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 170 p.
- Kouamé Y.M. (2017). Impacts des changements climatiques et de la dynamique d'occupation du sol sur les eaux de surface dans le bassin versant de la Davo, Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 195 p.
- 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), 183 p.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Eighth Conference on Applied Climatology*, 17-22 January 1993, California, Etats Unis : 179–184.
- Mora D.E., Campozano L., Cisneros F., Wyseure G. & Willems P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuodoreas Andes. *Hydrological Earth Système Science*, 18 : 63–648.
- Niasse M., Afouda A. & Amani 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 : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. *Union mondiale pour la nature*, Cambridge (Royaume-Uni), 71 p.

- Nicholson S.E., Kim J. & Hoopingarner J. (1988). Atlas of African rainfall and its interannual variability. In: *Bioclimatology and biogeography of Africa*. Edition Springer, Montpellier (France): 177-239.
- Noblet M., Faye A., Camara I., Sadio M. & Bah A. (2018). Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière, Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation, Climate Analytics GmbH, Berlin, 76 p.
- 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.
- Paturel J., Servat E., Delattre M.O. & Lubès-Niel H. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(3): 937–945.
- 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). Mémoire de Master, Université d'Antananarivo (Madagascar), 87 p.
- Rosni T. & Himayoun D. (2019). Spatio-temporal variation of drought characteristics, water resource availability and the relation of drought with large scale climate indices: A case study of Jhelum basin, India. *Elsevier*, 525: 140–150.
- Saley M.B., Tanoh R., Kouamé K.F., Oga M.S., Kouadio B.H., Djagoua E.V., Oularé S., Youan Ta M., Affian K., Jourda J.P. & Savané I. (2009). Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Géographie Physique et Environnement*, 5: 55-73.
- Seidou O. (2017). Évaluation de la performance des modèles climatiques sur le Niger. Rapport d'étude du Ministère des Transports du Niger, 61 p.
- Servat E., Paturel J.-E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Boyer O., Lubès-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. *International Association of Hydrological Sciences*, (252): 323–337.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé 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.
- Soro G. E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 172 p.
- Sorokoby V.M. (2013). Étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (SudOuest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 164 p.

- Steffen W. & Tyson (2001). *Global change and the Earth System: A planet under pressure*. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, 40 p.
- Taylor K.E., Stouffer R.J. & Meehl G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): 485–498.
- Touchebeuf P. & Girard G. (1962). Données sommaires sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. Annexe au rapport général sur les possibilités hydroélectriques en Côte d'Ivoire, 52 p.
- Vicente M.S., Begueria S. & Lopez-moreno J.I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23: 1696–1718.
- Vissin E. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne (France), 286 p.
- 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 Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yéo W.E. (2017). Effects of climate change and human activities on water resources in the Comoe river basin (West Africa). Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi Cotonou (Bénin), 118 p.

RÉSUMÉ

Situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, le bassin du fleuve Sassandra, regorge d'importantes ressources en eau. Bien qu'importantes, ces ressources sont menacées par la baisse importantes des pluies. Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). La méthodologie adoptée se décline 4 étapes. Les résultats de la variabilité climatique montrent une baisse des hauteurs de pluie et une augmentation des températures. Le changement climatique futur prévoit une hausse des températures minimales de 1,4 °C et 1,8°C aux deux horizons sous le scénario RCP4.5. Il prévoit également sous le scénario RCP8.5, une augmentation de 1,4°C à 2,3°C aux mêmes horizons. Concernant les températures maximales, le modèle prévoit une augmentation de 1,5°C et 1,8°C sous le scénario RCP4.5 aux deux horizons. Sous le scénario RCP8.5, le modèle annonce également une augmentation des températures maximales aux deux horizons de 1,4°C et 2,6°C. S'agissant des précipitations annuelles, les projections des hauteurs de pluies donnent une tendance à la hausse de 1% sur l'horizon 2030 et une tendance à la baisse de 1% sur l'horizon 2050 pour le scénario RCP 4.5. Le scénario RCP 8.5 lui prévoit une hausse des précipitations avec des taux supérieurs à 35% sur les deux horizons futurs.

Mots-clés : variabilité climatique, changement climatique, bassin versant du Sassandra.

ABSTRACT

Located in the West of Ivory Coast, the Sassandra river basin is full of important water resources. Although important, these resources are threatened by the significant drop in rainfall. The works presented in this thesis relate to the characterization of the climatic variability of the watershed of the Sassandra-river at Soubré (South west of Ivory Coast). The methodology adopted is divided into 4 stages. The results of climaticvariability show a drop in rainfall depths and an increase in temperatures. Future climate change predicts an increase in minimum temperatures of 1.40°C and 1.8°C at both horizons under scenario RCP4.5. It also forecasts under the RCP8.5 scenario an increase of 1.4°C to 2.3°C over the same horizons. Regarding maximum temperatures, the model forecasts an increase of 1.5°C and 1.8°C under the RCP4.5 scenario at two horizons. Under the RCP8.5 scenario, the model also announces an increase in maximum temperatures at the two horizons of 1.4° C and 2.6° C. With regard to annual precipitation, projections of rainfall depths give an upward trend of 1% over the 2030 horizon and a downward trend of 1% over the 2050 horizon for the RCP4.5

scenario. The RCP8.5 scenario predicts an increase in precipitation with rates higher than 35% over the two future horizons.

Keywords: climate variability, climate change, Sassandra watershed.