



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0307/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI 04 150 089 25

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option: Hydrologie

THÈME:

**Évaluation des signaux régionaux des changements
climatiques projetés sur le fonctionnement
hydrologique du bassin versant du fleuve Sassandra à
Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

COULIBALY Zana Mohamed

JURY

Président : M. BARIMA Yao Sadaïou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Encadreur : M. DJE Kouakou Bernard, Docteur-Ingénieur
Chef du Département de la Climatologie et des Applications
Météorologiques (SODEXAM)

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

Soutenu publiquement

le : 19/ 02/ 2021.



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0307/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI 04 150 089 25

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option: Hydrologie

THÈME:

**Évaluation des signaux régionaux des changements
climatiques projetés sur le fonctionnement
hydrologique du bassin versant du fleuve Sassandra à
Soubré**

Présenté par :

COULIBALY Zana Mohamed

JURY

Président : M. BARIMA Yao Sadaïou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Encadreur : M. DJE Kouakou Bernard, Docteur-Ingénieur
Chef du Département de la Climatologie et des Applications
Météorologiques (SODEXAM)

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

Soutenu publiquement

le : 19/ 02/ 2021.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- Ma mère AMANY Ahou Colette qui ne cesse de prier pour nous, pour un avenir radieux.
Longue vie Maman ;
- Mon oncle COULIBALY Aboubacar, toutes mes tantes en général, mais en particulier, COULIBALY Mariame et l'ainée, COULIBALY Assétou, grâce à qui je suis arrivé à ce stade de mes études. Merci pour tous les sacrifices et les efforts que vous consentez à mon égard. Que DIEU Vous accorde une longue vie ;
- Mes deux frères COULIBALY Samtrigué Karime l'ainé et COULIBALY Zié Aboubacar le dernier pour leur soutien indéfectible, pour leurs conseils et pour leurs encouragements ;
- Mon défunt père feu COULIBALY Adama. Repose en paix Papa ! Merci pour tous les sacrifices et les efforts que tu as consentis pour nous de ton vivant, sache que Nous sommes fiers d'être tes enfants.

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 commence tout d'abord par remercier les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête, Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Présidente de ladite Université.

Ensuite, remercier chaleureusement tout le personnel de l'UFR Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête, Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de ladite UFR. Merci Professeur, pour le travail que vous abattez pour la réussite des étudiants, sachez que vous êtes une source d'inspiration pour nous.

Par ailleurs, j'exprime ma reconnaissance aux responsables de la SODEXAM à savoir :

- le Directeur Général, Monsieur MOULOT Jean-Louis. Merci Monsieur de m'avoir accepté comme stagiaire dans votre structure ;
- le Directeur de la Météorologie Nationale, Monsieur KONATE Daouda, qui a œuvré pour que ce stage puisse se dérouler dans de très bonnes conditions ;
- le Chef de Département de la Climatologie et des Applications Météorologiques et Maître de ce stage, Monsieur DJE Kouakou Bernard, qui a permis que ce stage se déroule au sein de son Département et sous sa supervision et qui a suivi ce travail ;
- Monsieur Kassi Nicaise, Ingénieur de Conception Chargé d'études Agrométéorologiques qui a suivi de près et assisté au bon déroulement de mon stage ;
- Monsieur KANGA Brou Isidore, Chef du Service d'études de la Direction de la Météo Nationale, qui m'a énormément donné des coups de pousses ;

J'aimerais que tous les agents de la SODEXAM et particulièrement Monsieur COULIBALY Kolotioloma Alama, Chef de service climatologique 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 tiens à remercier Docteur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige.

Toute ma reconnaissance et mon respect vont au Docteur KOUADIO Zilé Alex, responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE), Directeur scientifique de ce mémoire et à la fois encadreur pédagogique de ce travail. Je me permets de saluer sa modestie et son accessibilité.

Il m'a fait bénéficier d'un stage, de son savoir, de son expérience et de la clairvoyance de ses opinions en hydrologie que je ne peux que saluer. Il a su par ses idées, ses conseils, ses explications et ses critiques alimenter l'âme de ce travail de recherche.

Je voudrais remercier également toutes les personnes du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) qui m'ont aidé et qui m'ont encouragé.

Je n'oublie pas, KOFFI Bérenger, KOUAME Jean Olivier et OUEDE Gla Blaise, Doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologie de L'Environnement pour leurs conseils, leur disponibilité et leur assistance, MORY Koutohi Jocelin, un doyen toujours disposé à aider dans la mesure du possible, SORO Ténena Épiphan et YADAN Agbassi Michael, mes compagnons de stage.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis et les membres de la famille COULIBALY qui m'ont toujours encouragé. Je pense à ZOKOU Ange Carine, à COULIBALY Ponh Yacouba, mon Oncle, DOUKOURE Mohamed, YAO Joseph, ADJORO Serge Arnaud, ABE Okaignin Jean François, GOUET Alain Fulonne, COULIBALY Tiérégnimin Alassane, SILUE Dolourou Issouf, et enfin au doyen KOUAME Guy mon aîné et compagnon de stage.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encadré, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous MERCI !!

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS	3
1.1. Généralités sur la zone d'étude.....	3
1.1.1. Présentation de la zone d'étude	3
1.1.2. Climat	4
1.1.3. Hydrographie.....	5
1.1.4. Relief	6
1.1.5. Végétation.....	7
1.2. Généralités sur l'étude de la variabilité et du changement climatique.....	9
1.2.1. Définition	9
1.2.2. Causes du changement climatique	10
1.2.3. Impacts sectoriels du changement climatique en Côte d'Ivoire.....	11
1.2.4. Modèles climatiques.....	13
1.2.4.1. Modèles Climatiques Globaux (MCG).....	13
1.2.4.2. Modèles Climatiques Régionaux (MCR)	14
1.2.4.3. Choix de la base de données CORDEX.....	14
1.2.4.4. Faiblesses des modèles climatiques	15
1.3. Généralités sur la modélisation hydrologique	16
1.3.1. Définition	16
1.3.2. Intérêt de la modélisation pluie-débit.....	16
1.2.4. Présentation du modèle GR2M	16
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	18
2.1. Matériel.....	18
2.1.1. Données de base	18
2.1.1.1. Données d'observation.....	18
2.1.1.2. Données de projection des modèles climatiques.....	19

2.1.1.3. Données de simulation des écoulements.....	19
2.1.2. Matériel de traitement des données	20
2.2. Méthodes	20
2.2.1. Choix des modèles climatiques régionaux	20
2.2.1.1. Contrôle de qualité des données observées	20
2.2.1.2. Reconstitution des données manquantes	20
2.2.1.3. Variabilité interannuelle des précipitations	21
2.2.1.4. Tendances du climat actuel de la zone d'étude.....	22
2.2.1.5. Tendances du climat futur de la zone d'étude.....	22
2.2.1.5.1. Diagramme de Taylor	22
2.2.1.5.2. Comparaison des régimes saisonniers de températures et de précipitations entre observation et modèles.....	23
2.2.2. Simulation du climat futur de chaque régime climatique aux horizons définis	24
2.2.3. Evaluation de l'impact des changements climatiques aux horizons définis.....	24
2.2.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon Hargreaves	24
2.2.3.2. Simulation des écoulements aux horizons futurs avec le modèle G2RM.....	25
2.2.3.2.1. Principe	25
2.2.3.2.2. Présentation générale du modèle G2RM	25
2.2.3.2.3. Calibration et validation du modèle GR2M	25
2.2.3.2.4. Méthode d'optimisation numérique.....	25
2.2.3.2.5. Critère d'optimisation du modèle	26
2.2.3.3. Lamme d'eau écoulée sur le bassin versant	26
2.2.3.4. Impacts des changements climatiques.....	27
2.2.3.4.1. Evolution des débits moyens mensuels à l'horizon 2030, 2050 et 2070.	27
2.2.3.4.2. Evolution des débits moyens annuels à l'horizon 2030, 2050 et 2070.....	27
PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	28
3.1. Résultats	28
3.1.1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie	28
3.1.2. Tendances du climat actuel de la zone d'étude.....	29
3.1.2.1. Variabilité décennale de la pluviométrie	29

3.1.2.2. Variabilité décennale de la température	30
3.1.3. Tendance du climat futur de la zone d'étude	31
3.1.3.1. Choix des modèles climatiques régionaux	31
3.1.3.2. Analyse des projections du cumul annuel des précipitations et des températures moyennes annuelles	35
3.1.4. Résultats du calage et de la validation du modèle GR2M.....	37
3.1.4.1. Performance du modèle	37
3.1.4.2. Hydrogrammes du calage et validation du modèle GR2M.....	38
3.1.4.3. Application des scénarii climatiques dans le modèle pluie débit	38
3.1.4.3.1. Evolution des débits moyens mensuels	39
3.1.4.3.2. Evolution des débits moyens annuels	40
3.2. Discussion.....	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	45
RÉFÉRENCES	47

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AAE	: Avarage Absolut Error
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CEMAGREF	: Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts
CORDEX	: Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
ETR	: Evapotranspiration Réelle
FAO	: Food and Agriculture Organization
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
GR2M	: Génie Rural à 2 paramètres Mensuel
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MCG	: Modèle de Circulation Générale
MCRs	: Modèles Climatiques Régionaux
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
RCP	: Representative Concentration Pathway
RMSE	: Root Mean Square Error
SODEXAM	: Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique
SPI	: Standard Precipitaton Index
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
UFR	: Unité de Formation et de Recherche

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques principales des RCP	13
Tableau II : Les modèles climatiques régionaux et leur origine.....	19
Tableau III : Classification de l'état de la saison en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé de précipitation (SPI)	22
Tableau IV : Caractéristiques du sous-bassin Buyo et des calages-validations du modèle GR2M	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude.....	3
Figure 2 : Carte des zones climatiques du bassin versant du Sassandra à Soubré	4
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Sassandra à Soubré.....	6
Figure 4 : Carte du relief du bassin versant du Sassandra à Soubré.....	7
Figure 5 : Carte de végétation du bassin versant du Sassandra à Soubré.....	8
Figure 6 : Carte géologique du bassin versant du Sassandra à Soubré	9
Figure 7 : Domaines du projet CORDEX	15
Figure 8 : Schéma conceptuel du modèle GR2M.....	17
Figure 9 : Localisation spatiale des stations météorologiques	18
Figure 10 : Evolution des indices standardisés de précipitation (IPS) dans les stations de Borotou, Daloa et Man de 1980 à 2010.....	29
Figure 11 : Tendence des précipitations annuelles sur la période 1981-2010.....	30
Figure 12 : Tendence des températures moyennes annuelles durant la période 1981-2010	31
Figure 13 : Diagramme de Taylor des séries mensuelles de la pluviométrie	32
Figure 14 : Diagramme de Taylor des séries mensuelles de la température	33
Figure 15 : Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles	34
Figure 16 : Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles	35
Figure 17 : Variation du cumul annuel des précipitations (cas du scénario RCP 4.5).....	36
Figure 18 : Variation des températures moyennes annuelles (cas du scénario RCP 4.5)	36
Figure 19 : Variation du cumul annuel des précipitations (cas du scénario RCP 8.5).....	37
Figure 20 : Variation des températures moyennes annuelles (cas du scénario RCP 8.5)	37
Figure 21 : Hydrogrammes des débits observés et simulés à la station de Buyo.....	38
Figure 22 : Hydrogrammes moyens aux horizons 2030, 2050 et 2070 comparés à celui de la période (1981-2000) aux séries du modèle GR2M	40
Figure 23 : Evolution de taux de variations des débits moyens annuels calculés aux deux horizons (2030, 2050 et 2070)	41

INTRODUCTION

Introduction

Le changement climatique est un phénomène qui peut entraîner des dommages importants tels que l'élévation du niveau des mers, l'accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones), la déstabilisation des forêts, les menaces sur les ressources d'eau douce, les difficultés agricoles (Baghdadli, 2014). D'après le GIEC (2007), les risques liés au changement climatique n'affectent pas de manière uniforme tout le globe. Pendant que dans la période 1900-2005 les précipitations augmentaient fortement dans l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le Nord de l'Europe et dans le Nord et le Centre de l'Asie, elles diminuaient considérablement au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie du sud de l'Asie.

L'Afrique, en dépit du rôle minime qu'elle joue dans le domaine de l'industrialisation, est le continent le plus touché, le plus vulnérable aux changements climatiques GIEC (2007). Selon la FAO (2018), cette vulnérabilité est due au manque de ressources, de capacités d'adaptation, et de l'importance que joue le secteur agricole pour les moyens d'existence et sa place dans l'économie nationale.

La variabilité climatique dans le monde a fait l'objet de nombreuses études dont celles de Rivard *et al.* (2003) et Boe (2007). En Afrique de l'Ouest, les travaux de Ardoin (2004), Goula *et al.* (2006), de Adja (2009), Ake (2010), Kouamé (2011), sont dédiés à la problématique de la variabilité et du changement climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau. Ces études menées montrent l'importance des changements climatiques marquée par une tendance à la sécheresse qui s'est manifestée à partir du début de la décennie 1960 (Kouassi, 2007). En Côte d'Ivoire, cette tendance à la sécheresse a causé une baisse considérable des caractéristiques hydrologiques (débits moyens annuels, débits moyens journaliers maximums, débits d'étiage) des grands cours d'eau et de leurs affluents. D'après Kouassi (2007), cette même 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. Selon Yao (2015), une baisse de la pluviométrie entamée à la fin de la décennie 1960 continue de se faire observer sur le bassin versant de la Lobo au centre Ouest de la Côte d'Ivoire. En Côte d'Ivoire, nous dénombrons sept (7) barrages hydro-électriques à savoir : Ayamé 1 et Ayamé 2 sur la rivière Bia, Kossou et Taabo sur le fleuve Bandama, Buyo et Soubré sur le fleuve Sassandra et enfin Fayé sur la rivière San Pedro (Konan *et al.*, 2013). Les barrages hydroélectriques de Buyo et Soubré produisent plus de la moitié de la production nationale d'électricité avec 440 MW sur 879 MW (Bourgin & Chenet, 2015). Cependant, avec leurs caractères tributaires des lames d'eau écoulées, et vu les menaces imminentes des changements climatiques, il serait indéniable de mener des études afin d'aider les

Introduction

décideurs à mettre en place des plans d'adaptations. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude dont le thème est : **Évaluation des signaux des changements climatiques projetés sur le bassin versant du Sassandra à Buyo à partir des projections régionales (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire).**

L'objectif général de cette étude est de déterminer l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Sassandra à Soubré.

De façon spécifique, il s'agit de :

- déterminer les modèles climatiques régionaux qui reproduisent le mieux, le climat de chaque régime climatique du bassin versant de Sassandra à Soubré ;
- simuler le climat futur de chaque régime climatique aux horizons 2030, 2050 et 2070 ;
- évaluer les impacts des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du fleuve Sassandra à Soubré aux horizons 2030, 2050 et 2070.

Le mémoire est articulé en trois (3) parties :

- la première partie porte sur les généralités de la zone d'étude ainsi que les notions liées à 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 leur discussion.

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

PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS

1.1. Généralités sur la zone d'étude

1.1.1. Présentation de la zone d'étude

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée (Figure 1) sous le nom de Feroudougouba. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 75 000 km² à la mer (Girard & Sircoulon, 1968 ; Camus, 1969). La partie située sur le sol guinéen a une superficie d'environ 8 000 km². Cette étude est menée sur la partie ivoirienne du bassin versant qui a pour exutoire le barrage hydroélectrique de Soubré. La zone d'étude est comprise entre les longitudes Ouest de coordonnées 6° et 9° et les latitudes Nord de coordonnées 5° et 10°, la superficie de cette zone est de 54 670 km².

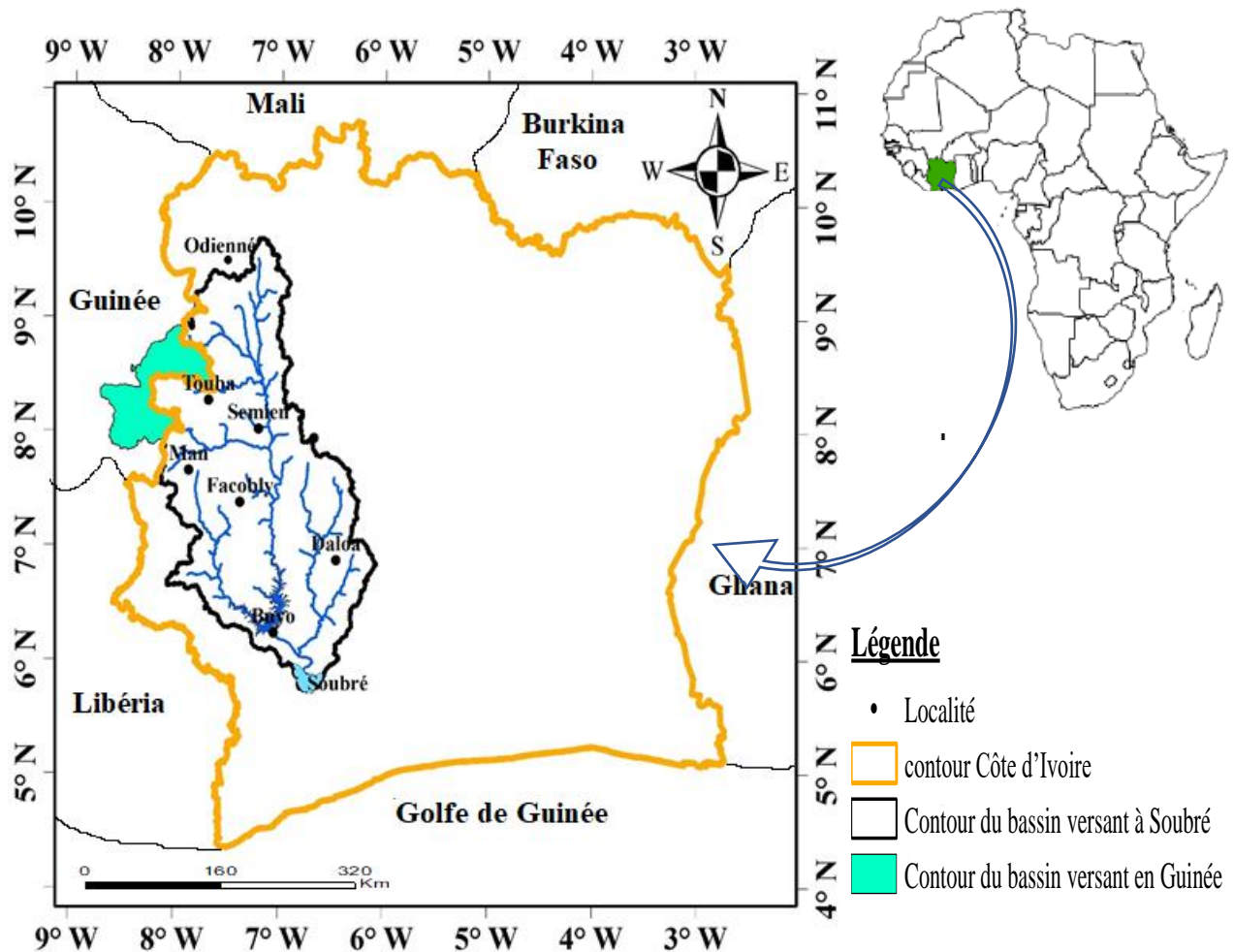


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude (Mory, 2020)

1.1.2. Climat

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

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

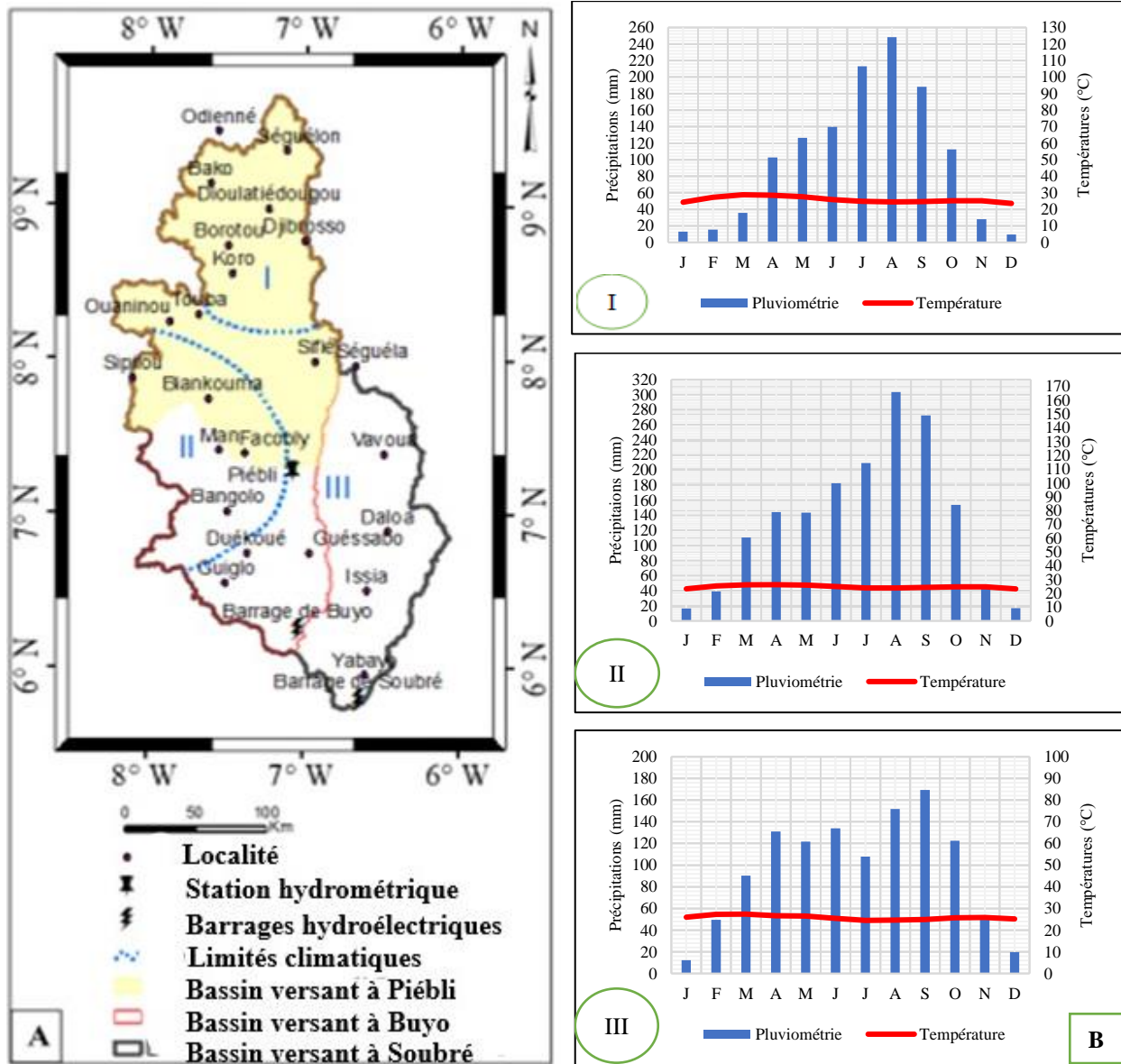


Figure 2 : Carte des zones climatiques du bassin versant du Sassandra à Soubré (Yéo, 2020)

➤ Zone climatique I : **climat tropical de transition atténué** :

Les régimes pluviométriques permettent de différencier deux faciès. On distingue le régime subtropical qui est constitué d'une bande qui fait la transition entre un climat de type tropical et de type sub-équatorial et le régime tropical qui est caractérisé par des traits typiquement tropicaux.

Le climat de cette zone est caractérisé par deux grandes saisons (Figure 2) :

- Une saison des pluies d'avril à octobre ;
- Une saison sèche de novembre à mars.

➤ Zone climatique II : **climat 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. Il s'agit, en réalité, d'une zone charnière entre les climats subéquatoriaux, tropicaux humides, sub-guinéens et tropicaux. En général, les traits des uns et des autres interfèrent d'une année à l'autre. Il est caractérisé par deux saisons (Figure 2) :

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

➤ Zone climatique III : **climat équatorial de transition atténué.**

Ce sont des climats de transition entre les climats équatoriaux et tropicaux. Les précipitations varient de 850 à 1700 mm. Ce climat est caractérisé par 2 saisons (figure 2) :

- Une grande saison des pluies (mars à octobre) ;
- Une petite saison sèche (novembre à février) ;

1.1.3. Hydrographie

Le fleuve Sassandra prend sa source dans la région de Beyla en Guinée, sous le nom de Féroudougouba (Girard & Sircoulon, 1968 ; Camus, 1969) (Figure 3). 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, il 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, il 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, il reçoit, en rive droite, le N'Zo. Ensuite des rapides coupent le lit du Sassandra : Bale, Broudé, Barakué,

Poutopotou, Bola. Puis il reçoit, en rive gauche, la Lobo qui est le dernier affluent avant la localité de Soubré (Camus, 1969 ; Girard *et al.*, 1970).

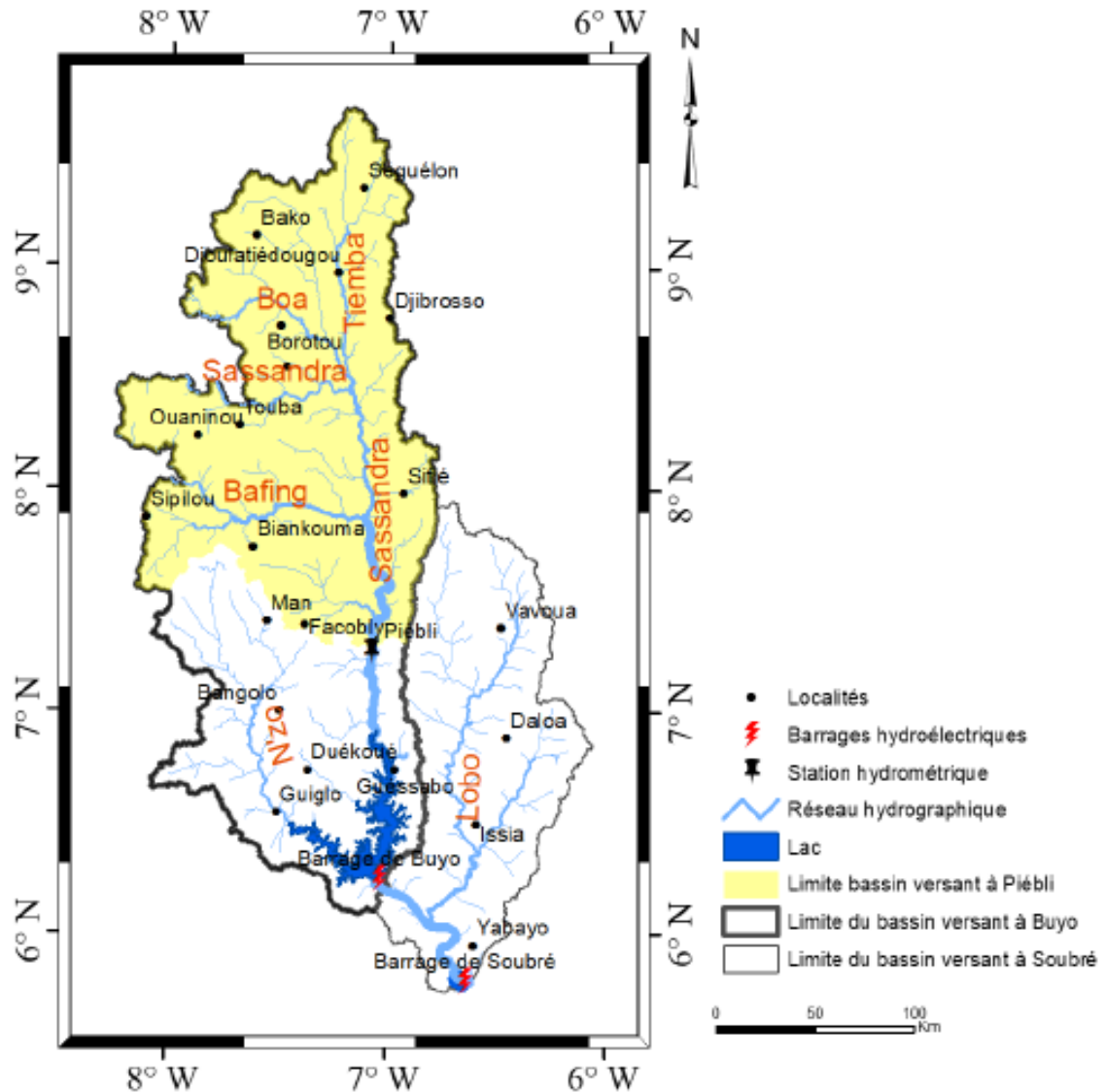


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Sassandra à Soubré (Yéo, 2020)

1.1.4. Relief

Dans son ensemble, le relief de la zone d'étude est peu contrasté. Il est surtout caractérisé par une sorte de monotonie (Figure 4). Suivant cette uniformité apparente, trois grands types de reliefs (Konan, 2001) sont distingués d'abord les plaines accentuées dans les régions Sud du bassin versant dont les altitudes varient de 97 à 200 m. Ensuite les plateaux prolongent les plaines vers le Nord et s'en détachent progressivement. Les altitudes varient entre 200 et 500 m. Et enfin les massifs montagneux, localisés à l'Ouest, principalement dans la région de Man avec des altitudes

supérieures à 1 160 m. Dans cette région, nous rencontrons 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.

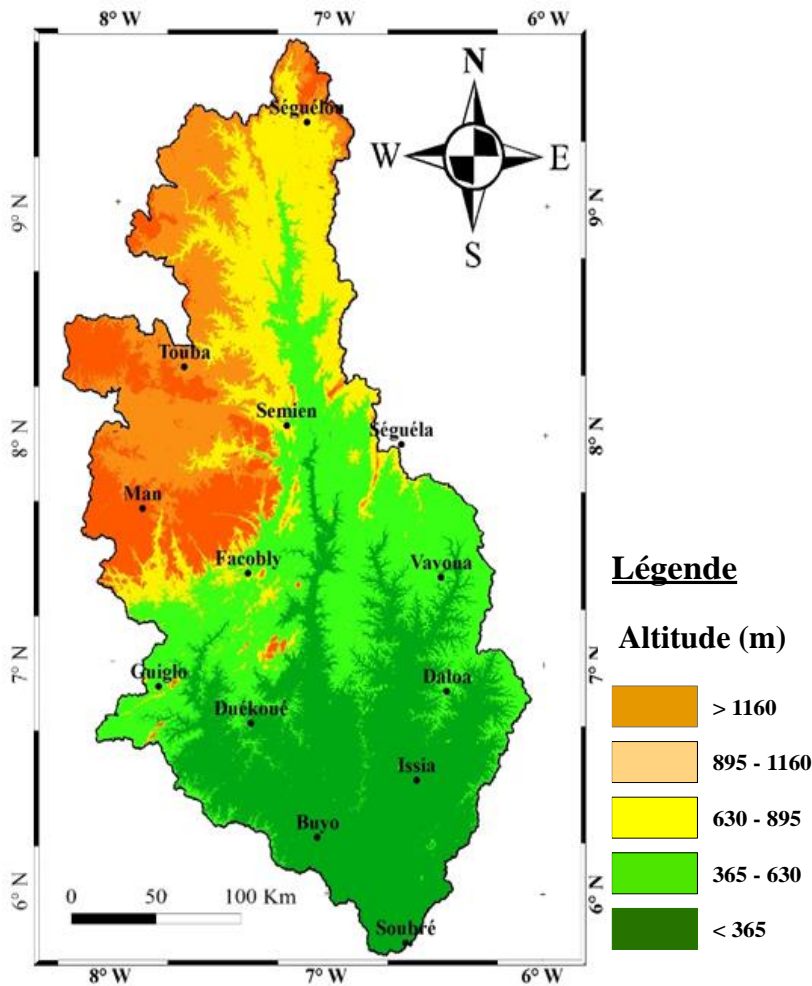


Figure 4 : Carte du relief du bassin versant du Sassandra à Soubré (Mory, 2020)

1.1.5. Végétation

Le bassin versant est couvert de deux types de végétation (Figure 5). Il s'agit d'un paysage forestier et d'un paysage de savane. Toutefois, la classification des régions agro-climatiques permet de faire les distinctions suivantes. Le Bas Sassandra forestier occupe les massifs forestiers du Sud auxquels se rattache le massif montagneux de Man. La végétation est limitée au Nord par la ligne Guitry-Soubré-Duékoué qui remonte le long du fleuve Sassandra à l'Ouest jusqu'au niveau du massif de Man. La végétation est couverte d'une forêt dense humide sempervirente (secteur hyperombrophile et secteur ombrophile) (Yéo, 2020). La végétation est couverte 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.

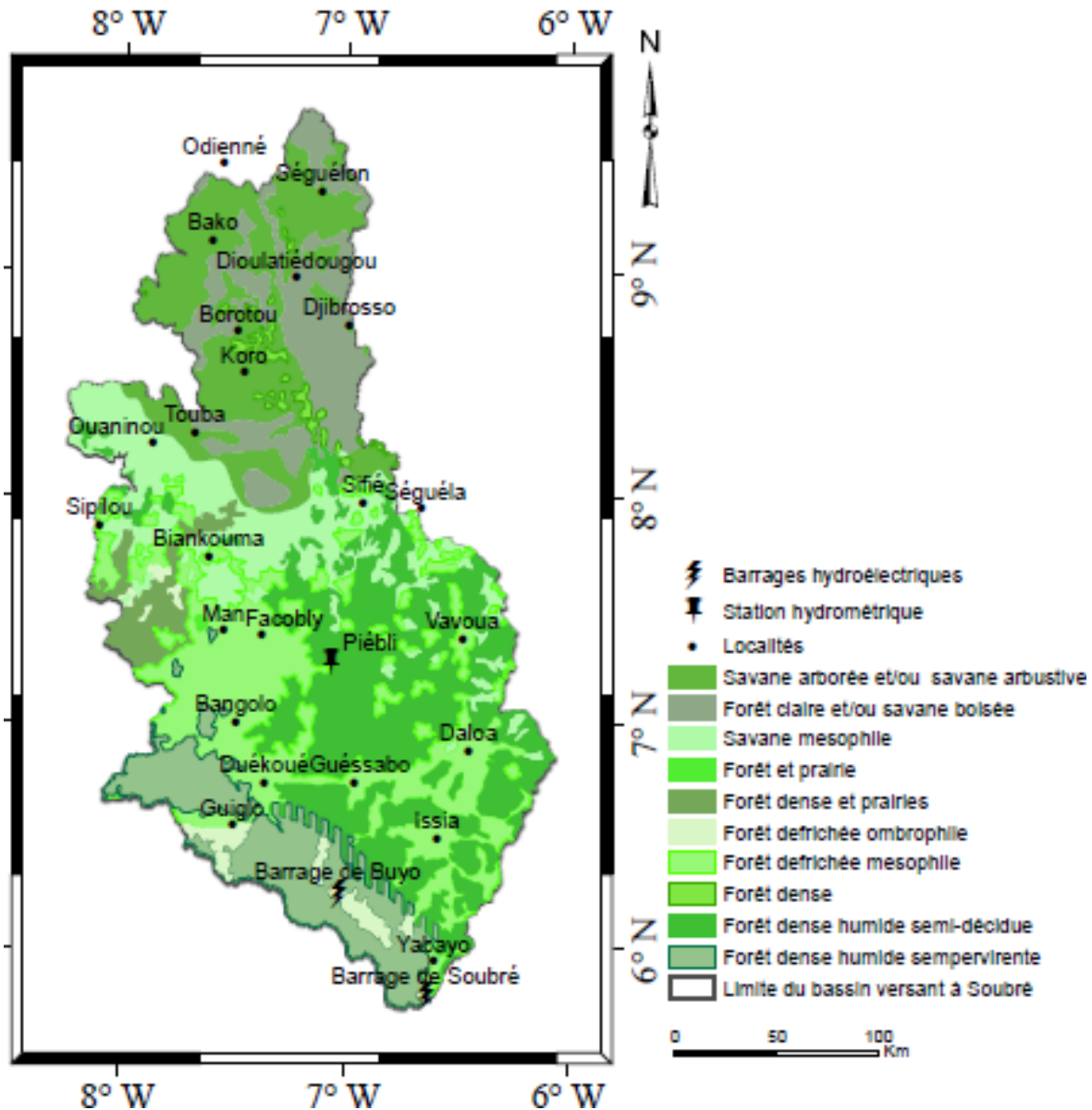


Figure 5 : Carte de végétation du bassin versant du Sassandra à Soubré (Yéo, 2020)

1.1.6. Géologie et pédologie

L'ensemble du bassin versant est constitué de formations du précambrien inférieur et moyen (Figure 6). Il s'aperçoit à travers des gneiss, des migmatites et des mylonites au Sud d'Odienné et un peu à l'Ouest de Séguéla. Le précambrien moyen occupe les 95% du socle. Il est marqué par des granites et des migmatites du Nord au Sud sur l'ensemble du bassin. Les migmatites, les formations de métamorphismes intenses et les formations stratigraphiques sont localisées dans les régions de

Guiglo et Soubré. Il y a la présence de quelques époutements de dolérites et basaltes du primaire dans la région de Touba et au Sud-est d'Odienné (Konan, 2001). Le bassin versant est dominé par les sols ferrallitiques plus ou moins saturés et indurés (Kadio, 1989). Les sols ferrallitiques sur roches précambriens et sur sédiments tertiaires y sont rencontrés. Nous rencontrons également des sols ferrallitiques montagnards et des sols ferrugineux.

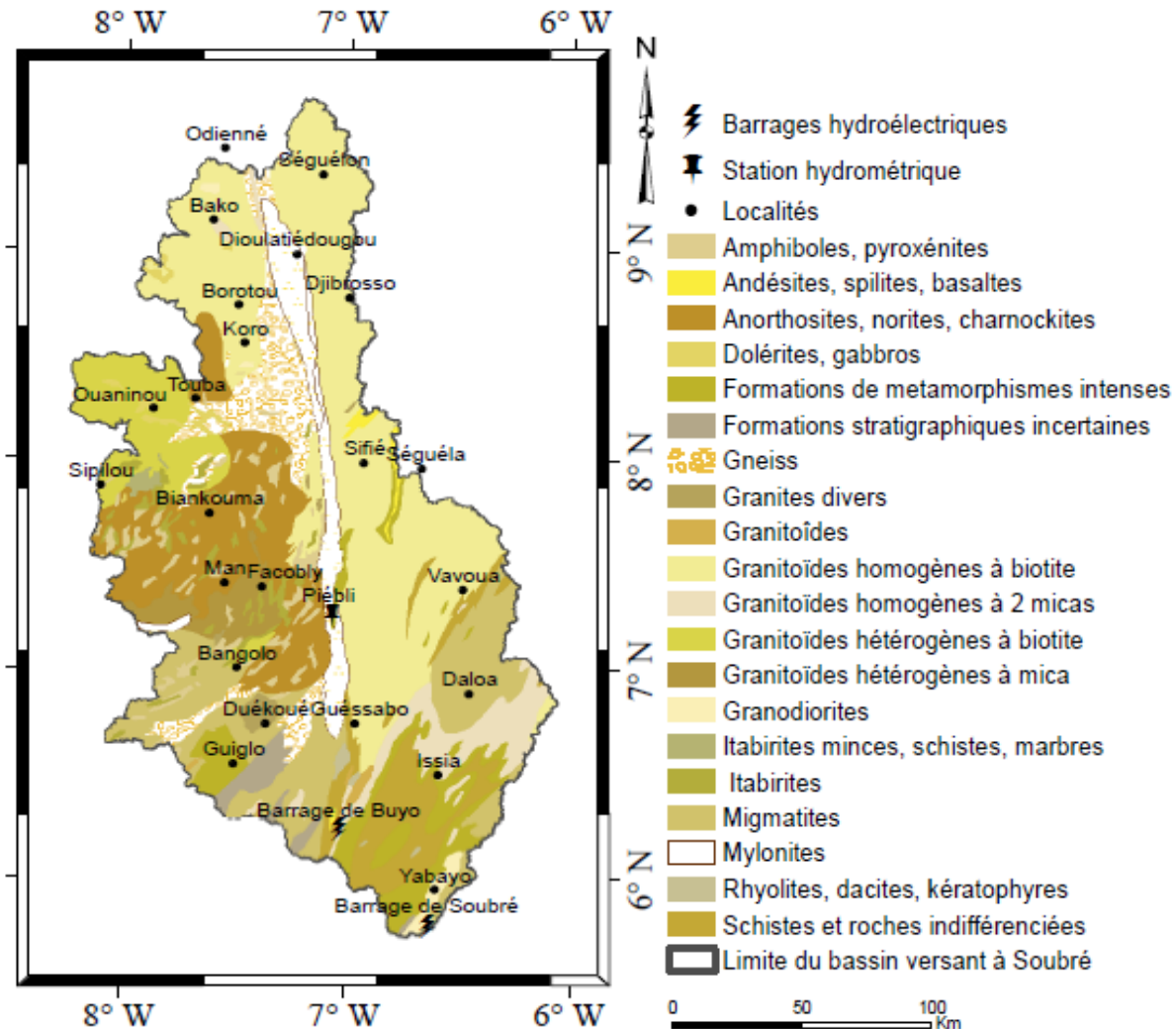


Figure 6 : Carte géologique du bassin versant du Sassandra à Soubré (Konan, 2001)

1.2. Généralités sur l'étude de la variabilité et du changement climatique

1.2.1. Définition

❖ Climat

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat se définit comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné calculées à partir de données observées

(GIEC, 2007). De ce fait, le climat est caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes. La détermination du climat repose sur une analyse du temps qu'il a fait chaque jour durant une longue période, en général trente années consécutives (Kouakou, 2011). Selon Rakotondrabe (2007), pour déterminer le climat, il faut se baser sur les observations météorologiques pour caractériser les états de l'atmosphère (la température de l'air, la pluie, la durée de l'insolation, la direction du vent, etc).

❖ **Changement climatique**

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

❖ **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 Niasse *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).

1.2.2. Causes du changement climatique

Selon (Yéo, 2017), le climat de la planète dépend de nombreux facteurs, principalement de la quantité d'énergie provenant du soleil, mais aussi de facteurs tels que la teneur en gaz à effet de serre (GES) et en aérosols de l'atmosphère ou les propriétés de la surface de la Terre. Ces facteurs conditionnent la quantité d'énergie solaire qui sera absorbée ou réfléchi dans l'espace (GIEC, 2007). Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone

(CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) se sont accrues de façon notable depuis le début de la révolution industrielle (GIEC, 2007). Ces augmentations sont principalement dues aux activités humaines, comme l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.), les changements d'affectation des terres et l'agriculture.

1.2.3. Impacts sectoriels du changement 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 de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) menées par Djè (2014) montrent que la saison des pluies s'est raccourcie en moyenne de 10 à 27 jours sur le littoral. Selon ces études, les retards de démarrage de la saison varient d'une à deux semaines selon la localité. Aussi, est-il 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 Djè (2014). Par ailleurs, ces mêmes études ont révélé que 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).

➤ 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).

❖ Définition de scénario climatique

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

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

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.

1.2.4. Modèles climatiques

1.2.4.1. 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).

1.2.4.2. 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).

1.2.4.3. Choix de la base de données CORDEX

L'expérience CORDEX (Jones *et al.*, 2011) vise essentiellement deux objectifs : fournir un cadre d'évaluation et de vérification de l'efficacité des modèles et concevoir une série d'expériences destinées à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation. Les résultats des MCRs seront ensuite pilotés par les conditions aux limites des modèles climatiques globaux (MCG) et des données ERA-Intérim. CORDEX est un projet international élaboré par le Programme mondial de recherche sur le climat. Il vise à étudier le climat régional et son évolution par la modélisation régionale. Il est soutenu par les plus grands centres de recherche internationaux sur le climat dont : Météo-France, le Met Office (Angleterre), l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace, France), le MPI (Max Planck Institute, Allemagne), le SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Suède) et d'autres, qui mettent en ligne sur une plateforme dédiée aux résultats de leurs simulations. Le projet d'intercomparaison des modèles atmosphériques (Gates *et al.*, 1999), mis en place au début des années 1990, et le projet d'intercomparaison des modèles océan-atmosphère (couplés) (CMIP, Covey *et al.*, 2003) sont de parfaits exemples d'une collaboration réussie de la recherche sur le climat. CORDEX met à disposition des simulations issues de modèles régionaux (RCM), eux-mêmes forcés par des modèles globaux (GCM). CORDEX est organisé en 14 domaines (Figure 7) qui possèdent chacun leurs propres couples GCM/RCM. Ces couples GCM/RCM constituent une descente d'échelle dynamique et permettent aux projections ainsi obtenues d'atteindre une résolution spatiale relativement fine ($0,11^\circ$, soit 12,5 km pour l'Europe). Les simulations appliquées à ces couples GCM/RCM couvrent les quatre scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) de réchauffement du climat issus du 5e rapport du GIEC : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6, et RCP 8.57.

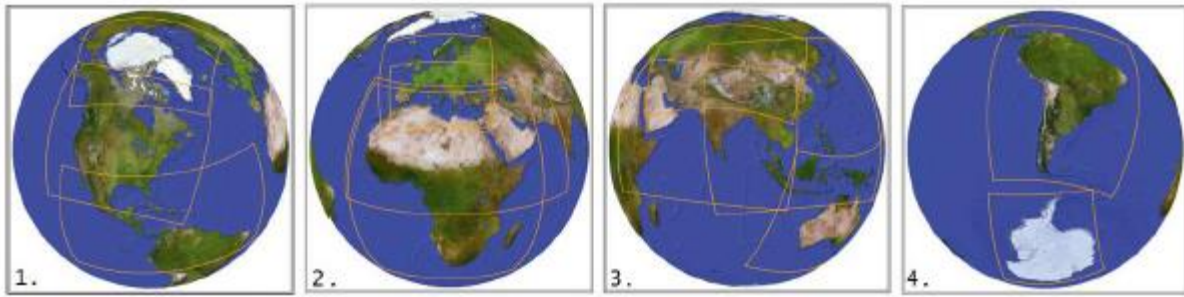


Figure 7 : Domaines du projet CORDEX (Institut Pierre-Simon Laplace)

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

1.2.4.4. Faiblesses des modèles climatiques

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

1.3. Généralités sur la modélisation hydrologique

1.3.1. Définition

Un modèle est une représentation mathématique d'un phénomène physique simple ou complexe (Kouakou, 2011). Il permet en faisant appel à des entités ou à des processus élémentaires de reconstituer ce phénomène.

1.3.2. Intérêt de la modélisation pluie-débit

Le modèle est destiné à aider et à répondre à des questions. Il est conçu en fonction de celles-ci et ne peut être utilisé que dans ce champ particulier (Kouakou, 2011). Son objectif principal est la réduction de la complexité naturelle. Les modèles pluie-débit servent en premier lieu à représenter dans le temps le cycle de l'eau, et permettent de transposer l'information climatique en information sur les écoulements (Tarik, 2006). Cependant, force est de constater que plusieurs modèles pluie-débit ont été conçus, et dont la majorité n'ont pas trouvé une application pratique en hydrologie. On peut donc conclure que la transposition d'un modèle se mesure par les degrés de robustesse de ses résultats et de sa représentativité des processus à modéliser.

1.2.4. Présentation du modèle GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuels) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été mis en place par le Cemagref (Lavabre *et al.*, 1993). Il a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Makhoulouf & Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006), qui ont permis d'améliorer progressivement sa performance. La structure du modèle, bien qu'empirique, l'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. La version utilisée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006). En outre, le modèle GR2M a déjà montré des performances satisfaisantes sur le bassin versant du Sassandra (Ouédraogo, 2001 ; Ardoin, 2004). Le modèle GR2M (Figure 8) est constitué :

- d'un réservoir de production qui régit la fonction de production et est caractérisé par sa capacité maximale ;
- et d'un réservoir eau gravitaire qui régit la fonction de transfert (routage).

Généralités

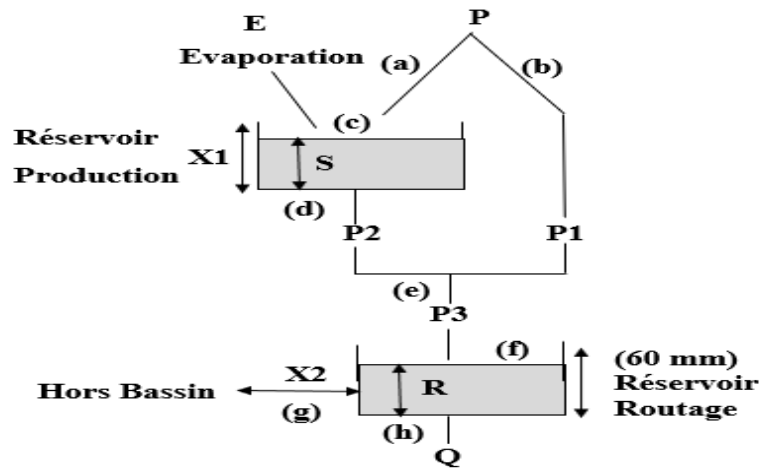


Figure 8 : Schéma conceptuel du modèle GR2M

Conclusion partielle

La zone choisie pour l'étude est le bassin versant du fleuve Sassandra dont l'exutoire est le barrage hydroélectrique de Soubré. Du point de vue morphologique, le bassin versant du Sassandra 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. Le bassin versant de Sassandra est soumis à trois régimes climatiques : régime équatorial de transition, régime équatorial de transition atténuée 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 avoir présenté les généralités sur la zone et sur les thématiques du sujet de l'étude, nous abordons la deuxième partie dédiée au matériel et méthodes.

PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

2.1.1. Données de base

2.1.1.1. Données d'observation

- Données climatiques

Les données de précipitations moyennes et de températures moyennes ont été utilisées. Elles sont toutes au pas de temps mensuel. Elles ont été fournies par la SODEXAM / Direction de la Météorologie Nationale sur la période 1981-2010. La période 1981-2010 est la période pour évaluer les tendances du climat actuel de la zone d'étude. Nous avons utilisé les données de trois (3) stations d'observations (Borotou, Daloa et Man) (Figure 9).

- Données hydrométriques

Les données hydrométriques utilisées dans le cadre de cette étude ont été obtenues à partir de la station hydrométrique de Buyo et couvre la période de 1981-2000. Les données de débits sont gérées par la Direction de l'Hydrologie (DH). Toutes ces données sont au pas de temps mensuel.

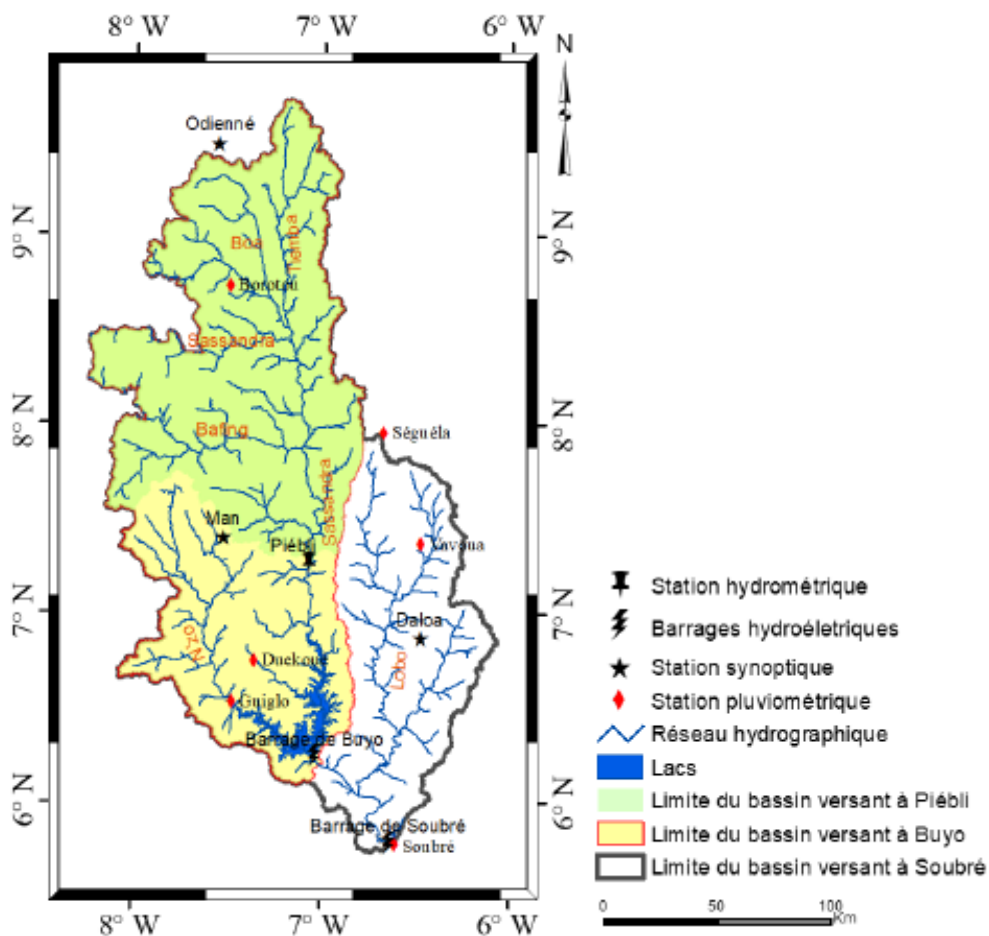


Figure 9: Localisation spatiale des stations météorologiques (Yéo, 2020)

2.1.1.2. Données de projection des modèles climatiques

Dans cette étude, nous avons utilisé les données mensuelles de températures (minimales et maximales) et de précipitations de 10 modèles climatiques régionaux du programme CORDEX-Africa (Tableau II), sur la base des scénarii d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 utilisées pour faire tourner le modèle GR2M. Trois périodes ont été définies sous ces deux scénarii pour simuler le climat futur : la période 2021-2040 comptant pour l'horizon 2030, la période 2041-2060 comptant pour l'horizon 2050 et la période 2061-2080 comptant pour l'horizon 2070. La période de contrôle (historique) est de 1981-2005 pour tous les modèles.

Tableau II : Les modèles climatiques régionaux et leur origine

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

Source : www.cordex.org (Consulté en Novembre 2020)

2.1.1.3. Données de simulation des écoulements

Nous avons utilisé des moyennes mensuelles des précipitations des sorties du modèle NCC, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la méthode de Hargreaves et des débits observés convertis en lame d'eau pour le calage et la validation. La période de référence pour la simulation des écoulements futurs est définie par la période 1981-2000. En effet, pour avoir une période plus représentative du climat actuel, nous avons utilisé une chronique future de 20 années pour chaque horizon soit la période 2021-2040 comptant pour l'horizon 2030, la période 2041-2060 comptant pour l'horizon 2050 et la période 2061-2080 comptant pour l'horizon 2070.

2.1.2. Matériel de traitement des données

Pour les besoins des traitements et d'analyses des données, des simulations et de cartographie, plusieurs logiciels ont été utilisés dans cette étude. Il s'agit de :

- **Excel 2016** pour le traitement statistique des données ;
- **Google Earth** pour la prise de coordonnées géographiques ;
- **Le modèle GR2M version 1.0 octobre 2006 sous Excel**, pour modéliser la relation pluie-débit ;
- **R Studio version 3.4.4** : pour la récupération des métadonnées générées par les modèles et aussi pour le calcul des indices climatiques.

2.2. Méthodes

2.2.1. Choix des modèles climatiques régionaux

La méthodologie passe d'abord par la caractérisation du climat passé (variabilité interannuelle des précipitations), ensuite du climat actuel (tendance du climat actuel) et enfin par le choix des modèles en se basant sur leurs performances (tendance du climat futur).

2.2.1.1. Contrôle de qualité des données observées

Le résultat des études d'impact du changement climatique, dépendrait de la qualité des données utilisées. Le contrôle de qualité a été fait sur les températures et les précipitations. Il a consisté à la vérification des valeurs déraisonnables, celles des précipitations négatives et des températures minimales supérieures aux températures maximales, à l'identification des valeurs aberrantes, c'est-à-dire les valeurs qui sont hors de l'intervalle : $[\mu - n.\sigma ; \mu + n.\sigma]$ ou μ désigne la moyenne, σ l'écart-type de la série chronologique et n (paramètre du logiciel Rclimindex) qui est un nombre à entrer par l'utilisateur (par défaut 3 pour la température et 200 pour la pluviométrie) (Zhang & Yang, 2004). Toute donnée déclarée aberrante est corrigée par le concourt du gestionnaire de la base de données de la direction de la météorologie nationale de Côte d'Ivoire. Dans le cas échéant, elle est déclarée manquante.

2.2.1.2. Reconstitution des données manquantes

La reconstitution consiste à combler les données manquantes dans une série chronologique. Les modalités et la difficulté de la reconstitution sont très variables selon la durée de la période d'absence d'informations.

❖ Données de pluie et de débits

Le comblement des lacunes des données de pluie et de débits s'est fait par la méthode de régression linéaire. L'application de cette méthode s'est faite en deux étapes. La première étape a consisté à établir des corrélations entre les stations voisines. En effet, pour les stations pluviométriques, la corrélation est faite entre les stations proches. Le comblement des données manquantes de débits a été fait à l'échelle mensuelle entre les stations successives (en amont ou en aval). Ce principe a été utilisé dans les travaux de Kouakou (2011) et Yao (2015). La seconde étape consiste à combler les données manquantes avec les données de la station ayant donné une bonne corrélation à l'aide de l'équation (1).

$$y = ax + b \quad \text{Eq.(1)}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \circ \quad a &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\ \circ \quad \text{et} \quad b &= \bar{y} - a\bar{x} \end{aligned}$$

x_i et y_i sont des valeurs mesurées respectivement aux stations x et y ; \bar{x} et \bar{y} sont les valeurs moyennes associées aux séries a et b sont des coefficients.

2.2.1.3. Variabilité interannuelle des précipitations

La variabilité climatique a été étudiée sur la période 1981-2010. Pour se faire, les paramètres de températures et de précipitations ont été utilisés. Il a été question de déterminer les années humides, sèches, chaudes ou froides par le calcul de l'Indice de Pluie Standardisé (IPS). Cet indice est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\text{SPI} = \frac{P_i - P_m}{\delta_p} \quad \text{Eq.(2)}$$

Où

- P_i : cumul annuel de la pluviométrie de l'année i ;
- P_m : valeur moyenne obtenue de la pluviométrie sur la période 1981-2010
- et δ_p : l'écart type calculé sur la période 1981- 2010.

Pour identifier la nature d'une année en fonction des valeurs des IPS obtenus, le tableau III est utilisé.

Tableau III : Classification de l'état de la saison en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé de précipitation (SPI)

SPI	Signification
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	modérément sec
de -1,5 à -1,99	très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

2.2.1.4. Tendance du climat actuel de la zone d'étude

Dans cette section, nous avons déterminé la tendance des températures et précipitations au niveau des différentes stations de la zone d'étude sur la période 1981-2010. Pour ce faire, nous avons déterminé la variabilité décennale des pluies et de la température en calculant les moyenne sur 10 ans des mois de janvier, février jusqu'au mois de décembre. La période 1981-2010 a été divisée en trois (3) décennies (1981-1990, 1991-2000 et 2001-2010). Les résultats sont représentés sous forme de graphiques.

2.2.1.5. Tendance du climat futur de la zone d'étude

La tendance du climat futur a été étudiée en déterminant les changements climatiques attendus des paramètres températures et précipitations aux horizons 2030, 2050 et 2070 par rapport à la période historique des modèles. Un choix de 2 modèles climatiques régionaux a été fait. Ce choix est basé sur la capacité des modèles à reproduire la climatologie des différentes stations. Pour cela, deux méthodes ont été utilisées : le diagramme de Taylor et la comparaison des régimes saisonniers de températures et de précipitations entre l'observation et les modèles.

2.2.1.5.1. Diagramme de Taylor

L'étape initiale de l'utilisation des modèles climatiques pour l'évaluation des impacts du changement climatique est de vérifier leur aptitude à reproduire la climatologie de la zone d'étude (Taylor, 2001). Pour cela, le diagramme de Taylor a été utilisé et appliqué aux séries mensuelles standardisées de températures et de précipitations. C'est un digramme bidimensionnel qui permet de voir le lien entre les données observées et simulées à partir de trois paramètres statistiques concis tels que : la corrélation (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type. L'analyse de

Taylor fournit un résumé statistique concis des relations entre les données simulées par les modèles et les données observées en termes :

✚ de leur corrélation (R), elle permet de déterminer le pouvoir de prédiction des modèles en comparant les valeurs prédites et les valeurs observées ;

$$R = \frac{COV(O_i, S_i)}{\delta O_i \times \delta S_i} \quad \text{Eq.(3)}$$

Avec $COV(O_i, S_i)$: la covariance des valeurs observées et simulées ;

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

✚ de leur Root Mean Square Error (RMSE), le RMSE permet de quantifier la différence entre la simulation et l'observation ;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{Eq.(4)}$$

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

N désigne le nombre de couple de données à comparer.

✚ et de leur erreur absolue moyen ou AAE (Average Absolut Error) ;

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{N} \quad \text{Eq.(5)}$$

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

N désigne le nombre de couple de données à comparer.

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

2.2.1.5.2. Comparaison des régimes saisonniers de températures et de précipitations entre observation et modèles.

Le régime saisonnier de la température moyenne et des précipitations a été représentés pour la période 1981-2005. Pour chaque paramètre, nous avons représentés sur le même graphique le régime saisonnier des 10 modèles climatiques régionaux et celui de l'observation dans l'optique d'appréhender lequel des modèles reproduisent mieux la variabilité saisonnière de l'observation.

2.2.2. Simulation du climat futur de chaque régime climatique aux horizons définis

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

$$\text{Déviation } i = \frac{\text{Cum } i - \text{CumCTRL}}{\text{CumCTRL}} * 100 \quad \text{Eq.(6)}$$

Avec *Cum i* désignant le cumul annuel des précipitations de l'année *i* ;

CumCTRL correspondant au cumul annuel moyen des précipitations sur la période de contrôle (1981-2005).

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

$$\text{Déviation } i = T_{\text{moy } i} - T_{\text{moyCTRL}} \quad \text{Eq.(7)}$$

Avec *Tmoy i* désignant la température moyenne annuelle de l'année *i* ;

2.2.3. Evaluation de l'impact des changements climatiques aux horizons définis

2.2.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon Hargreaves

La formule de Hargreaves (Equation 8) exprime l'ETP (mm) en fonction de la température et latitude. Elle s'écrit :

$$ETP = 0,0023Ra(T_{\text{mean}} + 17,8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \quad \text{Eq. (8)}$$

Où :

- *Ra* = équivalent en eau du rayonnement extraterrestre (mm jour⁻¹) ;
- *Tmean* = la température moyenne de l'air (°C) ;
- *Tmax* = température maximale de l'air (°C) ;
- *Tmin* = température minimale de l'air (°C).

Pour déterminer l'ETP, nous avons utilisé les données futures de précipitations, de températures minimales (*Tmin*) et de températures maximales (*Tmax*) du modèle NCC. Ce calcul nous a été effectué par le logiciel Rstudio.

2.2.3.2. Simulation des écoulements aux horizons futurs avec le modèle G2RM

2.2.3.2.1. Principe

La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du fleuve Sassandra à Soubré est constituée de quatre étapes :

- 1- la préparation des données d'entrée du modèle (précipitations, lame d'eau écoulée et ETP) ;
- 2- le calage et la validation du modèle conceptuel GR2M avec les données réellement observées ;
- 3- utilisées les sorties futures (précipitations et ETP) du modèle retenu depuis la base de données CORDEX-Africa ;
- 4-simulation des écoulements à l'aide du modèle conceptuel GR2M à partir des paramètres calés à l'étape (2) et des séries chronologiques construites à l'étape (3).

2.2.3.2.2. Présentation générale du modèle G2RM

Le modèle GR2M est un modèle de bilan qui permet une meilleure simulation de la lame d'eau écoulée et la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR). Nous avons utilisé ce modèle pour simuler les données futures de débits en fonction de chaque scénario dans l'optique d'appréhender les éventuels changements climatiques sur le bassin versant de Sassandra.

2.2.3.2.3. Calibration et validation du modèle GR2M

Le calage et la validation ont pour but d'ajuster les paramètres du modèle de façon à ce que l'adéquation entre les débits simulés et observés soit maximale. La validation des performances du modèle hydrologique est réalisée grâce à une procédure de calage-validation suivant le principe du « differential split-sample test » (Bourgin & Riffard-Chenet, 2015). Pour le calage du modèle, nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X1 et X2 jusqu'à l'obtention de valeurs du critère de Nash acceptables (Perrin *et al.*, 2007). Nous avons donc tracé les graphiques des séries observées et calculées pour l'ensemble des calages et des validations effectués avec le modèle GR2M. De plus, il faut examiner les tracés des hydrogrammes observés et calculés.

2.2.3.2.4. Méthode d'optimisation numérique

La méthode d'optimisation utilisée est le Solveur sous Excel. Il permet de rechercher la valeur optimale d'une formule dans une cellule, appelée cellule cible de la feuille de calcul. Il fonctionne avec un groupe de cellules associées, soit directement, soit indirectement, à la formule de la cellule cible. Il adapte les valeurs des cellules que nous souhaitons modifier, appelées cellules variables, pour fournir le résultat spécifié à partir de la formule de la cellule cible. Les contraintes pour limiter

les valeurs susceptibles d'être utilisées comme modèles par le Solveur sont posées, et ces contraintes font référence à d'autres cellules qui ont une incidence sur la formule de la cellule cible.

❖ Cellule cible à définir

La cellule cible est la cellule dans laquelle nous souhaitons attribuer une valeur maximale du critère de Nash. Cette cellule contient la formule du critère de Nash.

❖ Cellules variables

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

2.2.3.2.5. Critère d'optimisation du modèle

Le critère appliqué dans cette étude est celui proposée par Nash & Sutcliffe (1970). Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité de l'ajustement et de faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements ont des ordres de grandeur différents. Le critère de Nash s'exprime comme suit (équation 9) :

$$\text{NASH (Q)} = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_i (Q_0^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_0^i - Q_m^i)^2} \right] \quad \text{Eq. (9)}$$

Avec Q_0^i : débit mensuel observé, Q_c^i : débit mensuel calculé, Q_m^i : débit moyen mensuel observé.

La performance du modèle est jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash (Perrin, 2000)

- Nash \geq 90% : le modèle est excellent ;
- 80% < Nash < 90% : le modèle est très satisfaisant ;
- 60% < Nash < 80% : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60% : le modèle est mauvais.

2.2.3.3. lame d'eau écoulee sur le bassin versant

Le calcul de la lame d'eau mensuelle (LE) s'obtient par la formule suivante :

$$\text{LE} = 86,4 \times N_j \times \frac{Q}{S} \quad \text{Eq.(10)}$$

Où

- LE : lame d'eau écoulee sur le bassin versant (mm/mois),
- Q : débit du cours d'eau mesurée à une station donnée (m³/s),
- S : surface de la section du bassin versant à une station donnée (Km²),
- 86,4: facteur de conversion et N_j : nombre de jours

2.2.3.4. Impacts des changements climatiques

2.2.3.4.1. Evolution des débits moyens mensuels à l'horizon 2030, 2050 et 2070.

Pour appréhender et évaluer les éventuels impacts des changements climatiques futurs, nous avons comparé les hydrogrammes moyens mensuels des horizons 2030, 2050 et 2070 à celui de la période de référence des débits (1981-2000) et vérifier si les variations mensuelles de température et de précipitations induites par les changements climatiques s'accompagnent de modifications des régimes hydrologiques.

2.2.3.4.2. Evolution des débits moyens annuels à l'horizon 2030, 2050 et 2070.

Pour évaluer les éventuels impacts des changements climatiques futurs, nous avons montré l'évolution des écoulements moyens annuels simulés aux horizons 2030, 2050 et 2070 par rapport à celui de la période de référence des débits (1981-2000), les taux de variations des débits annuels ont été déterminés pour vérifier s'il existe des déficits ou des excédents d'écoulements importants par rapport à ceux de la période 1981-2000.

PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie

La période de référence a été marquée par une alternance d'années excédentaires et déficitaires (Figure 10) avec des SPI négatifs majoritaires et une dominance du seuil de sécheresse proche de la normale ($-0,99 < \text{SPI} < 0$). Cependant des spécificités relatives à certaines périodes sont à dégager. A la station de Borotou, les années 1995 et 2007 ont été marquées par la sécheresse (SPI = -1,97 et SPI = -1,71). Mais, en dépit du caractère sec de la période (1981-2010), on observe des années humides. L'année 2007 a été une année extrêmement humide (SPI = +2). Concernant la station de Daloa, les SPI marquant les années les plus sèches sont enregistrés en 1991 et 2001 (SPI = -1,51 et SPI = -1,5). L'année 2007 a été une année extrêmement humide (SPI = +2,61). A la station de Man les années 1983 et 1993 ont été des années très sèches (SPI = -1,94 et -1,77). Les années 1999 et 2010 ont été extrêmement humides (SPI = +2,01 et +2,08). Un retour vers la période humide est observé au niveau des trois stations de la zone d'études.

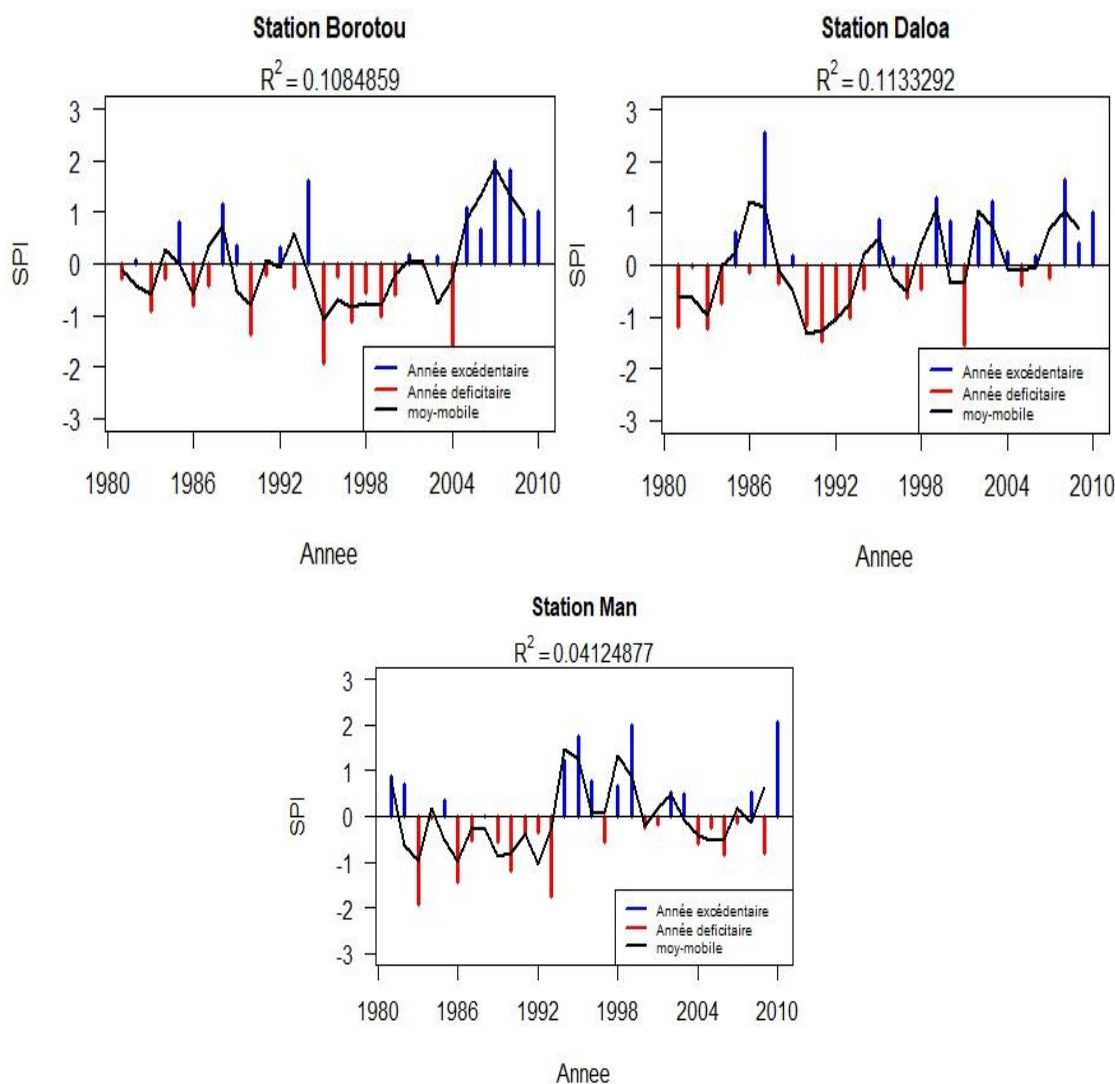


Figure 10 : Evolution des indices standardisés de précipitation (IPS) dans les stations de Borotou, Daloa et Man de 1980 à 2010.

3.1.2. Tendence du climat actuel de la zone d'étude

3.1.2.1. Variabilité décennale de la pluviométrie

La distribution temporelle de la pluviométrie annuelle de la station de Borotou est identique à celle de Daloa (Figure 11). Cette distribution suit généralement un gradient croissant sur la période observée. Elle suit donc une tendance à la hausse sur la période (1981-2010). La station de Man quant à elle, suit un gradient décroissant. Au cours de cette période, la précipitation moyenne annuelle calculée sur la première décennie (1981-1990) de la série est de 1 249,3 mm. Elle baisse légèrement à 1 198,4 mm durant la deuxième décennie (1991-2000), soit un taux de 4 % (51 mm) au niveau de la station de Borotou. Durant la troisième décennie, elle augmente significativement

de 11 % (158,3 mm) pour atteindre la valeur de 1 407,6 mm. Au niveau de la station de Daloa, la précipitation moyenne annuelle sur la période (1981-2010) est de 1155 mm pour la première décennie (1981-1990). Elle baisse très légèrement de 1% soit de 8,3 mm pour passer à 1 146,7 mm durant la deuxième décennie (1991-2000). Durant la troisième décennie, elle augmente significativement de 7 % soit 84,4 mm et atteint la valeur de 1 239,4 mm, A la station de Man, la première décennie enregistre une valeur moyenne de 1564,8 mm. A la deuxième décennie, on observe une baisse de 2 % soit une baisse de 26,9 mm. Elle enregistre 1 537,8 mm. A la troisième décennie, une autre baisse est observée, elle est de 3 % soit 49,9 mm.

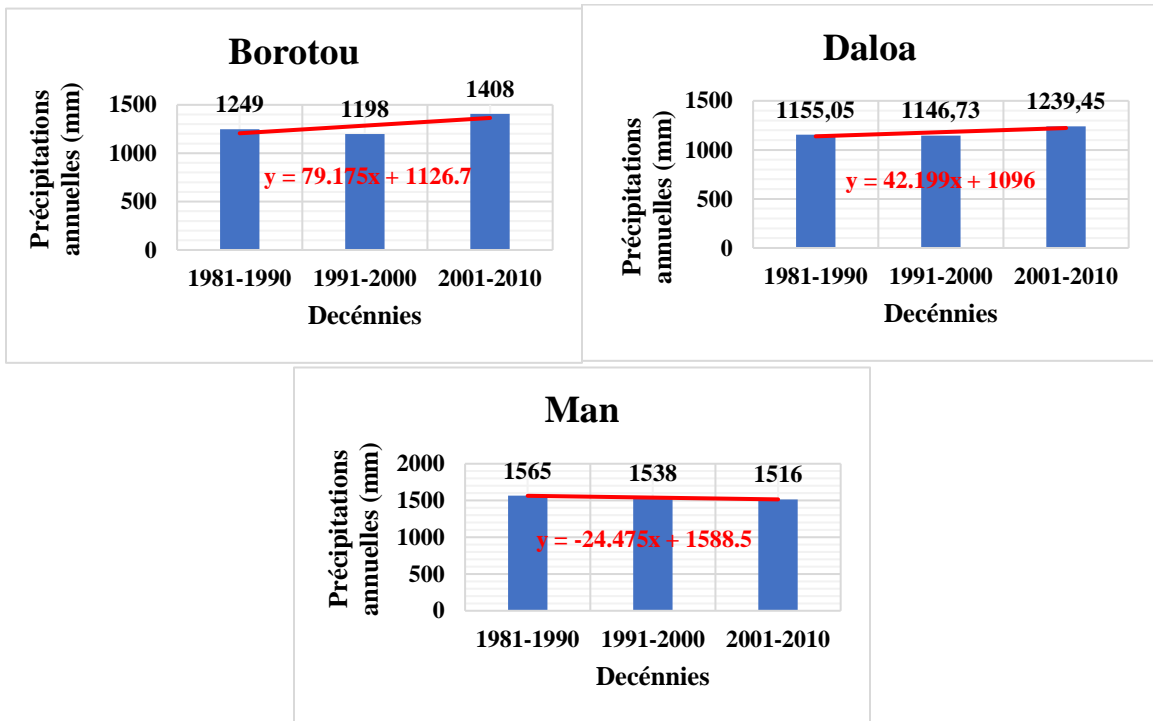


Figure 11 : Tendance des précipitations annuelles sur la période 1981-2010

3.1.2.2. Variabilité décennale de la température

Concernant les températures moyennes annuelles, l'analyse des tendances montre une augmentation progressive à chaque station, une tendance à la hausse. Au niveau de la station de Borotou, on observe une augmentation moyenne respectivement de 0.2 °C et 0.6°C. A la station de Daloa, la température augmente chaque décennie de 0.06 à 0.37°C. Pour la station de Man, on observe les mêmes tendances à la hausse avec une augmentation de 0.27 à 0.39°C. Rappelons que toutes ces variations sont fonctions de la décennie 1981-1990.

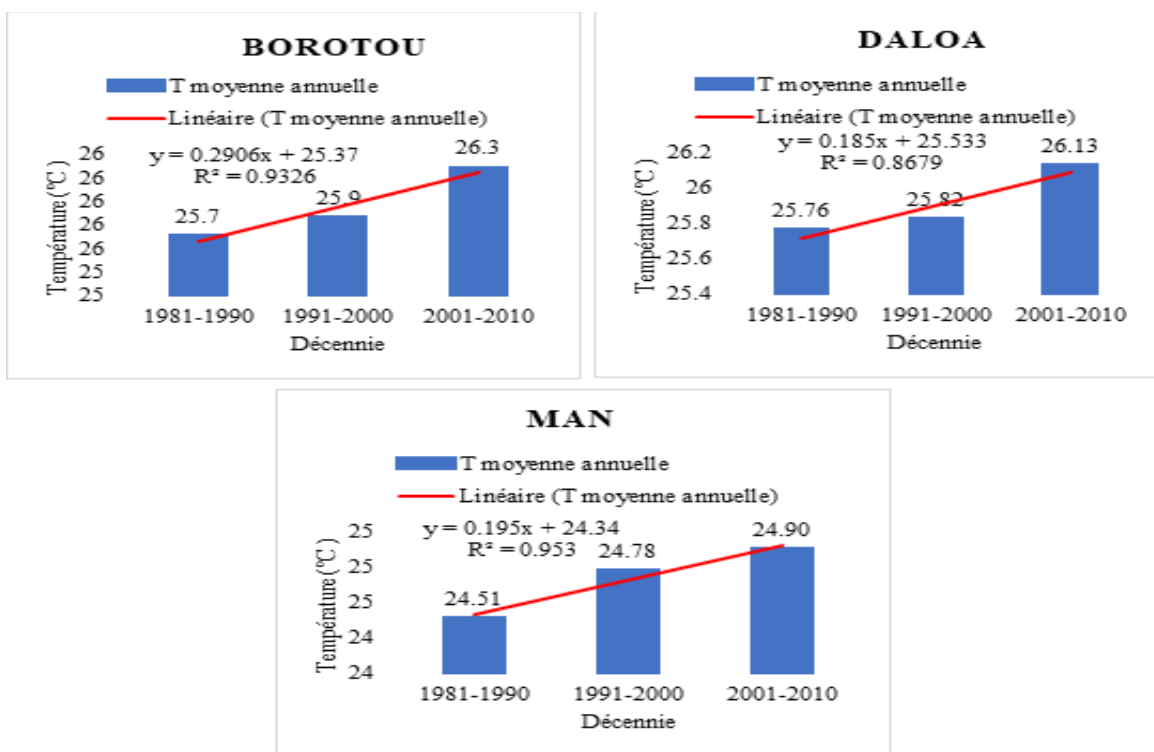


Figure 12 : Tendence des températures moyennes annuelles durant la période 1981-2010

3.1.3. Tendence du climat futur de la zone d'étude

3.1.3.1. Choix des modèles climatiques régionaux

La comparaison statistique de la distribution intra-saisonnière du cumul des précipitations simulées par les modèles aux observations à la station de Borotou montre une très grande variabilité (Figure 13). Néanmoins, les modèles climatiques IPSL et NCC ont montré une corrélation (R) d'au moins de 0,98 avec les observations et un écart type de 1,1. Au niveau de la station de Daloa les modèles climatiques ICHEC et NCC ont une corrélation (R) supérieur à 0,96 avec les précipitations observées et une erreur absolue de simulation de moins de 1,2 par rapport aux observations. Pour la station de Man, les modèles climatiques IPSL et NCC ont montré les meilleures performances pour simuler la climatologie des précipitations. Le coefficient de corrélation est au moins égal à 0,96. Les deux modèles présentent une erreur absolue de simulation de moins de 0,5 par rapport aux précipitations observées.

Concernant les températures (Figure 14), au niveau de Borotou, tous les 10 modèles sont assez bien corrélés avec les observations ($0,7 \leq R \leq 0,99$). Les modèles NCC, et ICHEC ont montré les plus fortes corrélations avec les températures observées avec $R > 0,97$, de plus, ces MCRs présentent un écart type compris entre 0,7 à 0,85 par rapport aux observations. En outre, pour les températures,

Résultats et discussion

à Daloa, nous constatons que les 10 modèles sont assez bien corrélés avec les observations avec R supérieure à 0,79, mais présentent de forte déviation par rapport aux observations (écart type $\geq 0,89$). Au niveau de la station de Man, les modèles ne sont assez bien corrélés avec les températures observées ($0.1 \leq R \leq 0,85$) mais présentent un bon écart type entre les températures simulées et observées. On note un écart-type compris entre 0,5 et 1,2

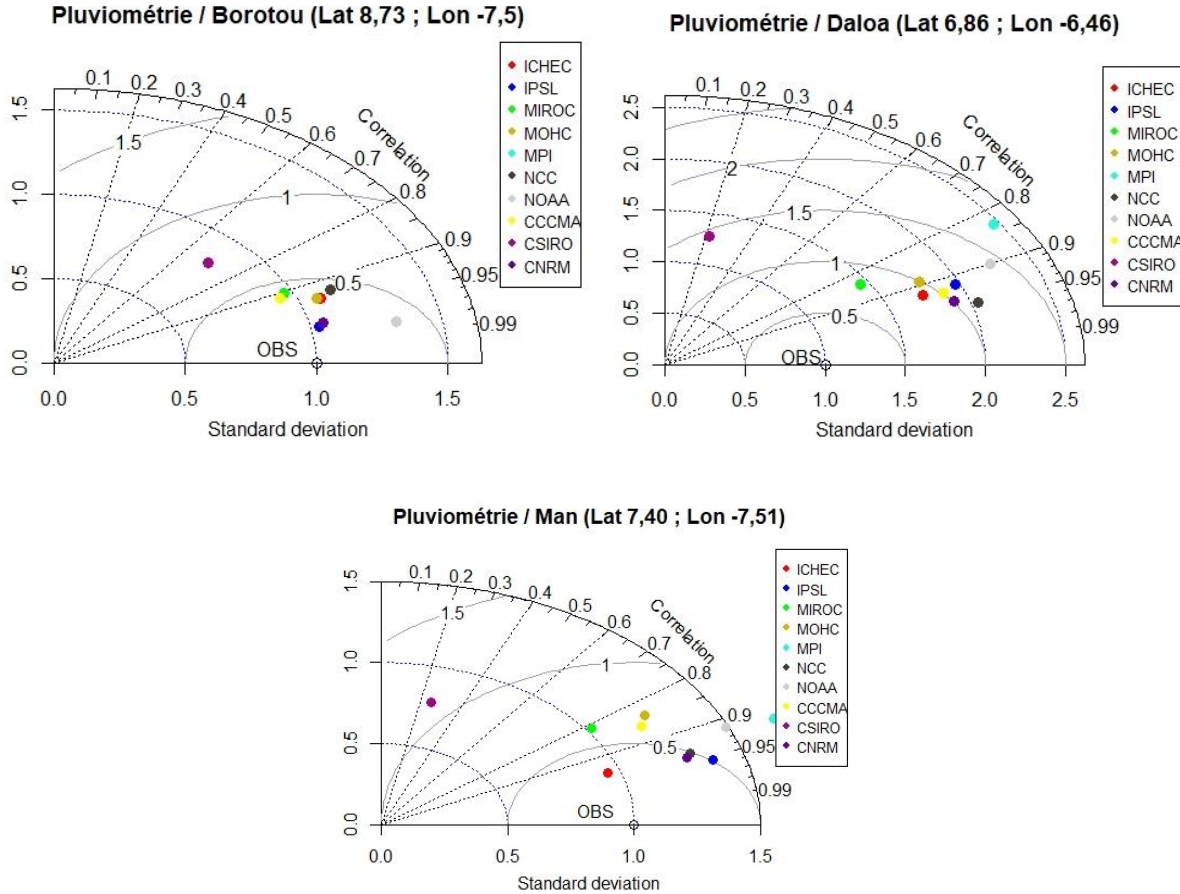


Figure 13 : Diagramme de Taylor des séries mensuelles de la pluviométrie

Résultats et discussion

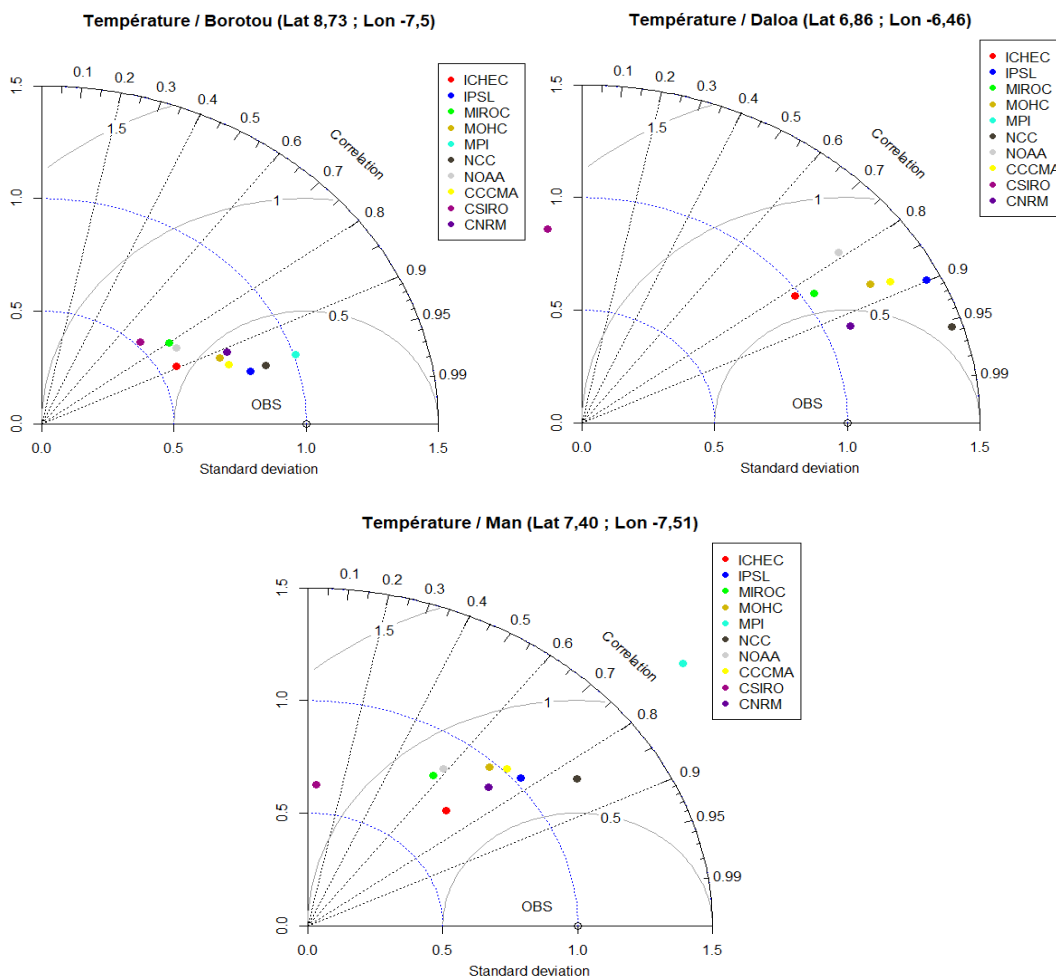


Figure 14 : Diagramme de Taylor des séries mensuelles de la température

Tableau 3 : MCRs choisis au niveau de chaque zone agro climatique

Station	MCRs Choisis	Types de stations
Daloa	ICHEC, NCC	Synoptique
Man	IPSL, NCC	Synoptique
Borotou	IPSL, NCC	Poste pluviométrique

L'étude de la distribution intra saisonnière des précipitations sur la période de contrôle comparée aux observations au niveau des stations de Borotou (Figure 15), montre que l'ensemble des MCRs simulent bien la tendance et détectent bien en moyenne le mois le plus pluvieux (Août). En Août, à la station de Borotou, le cumul mensuel des pluies observées est de 249 mm, celui-ci est surestimé de 2 mm par le modèle IPSL et de 17 mm par les modèles NCC. De même, pour la station de Man,

Résultats et discussion

les deux (2) MCRs simulent assez bien la saisonnalité des précipitations. Le cumul mensuel des précipitations à la station de Man au mois d'août est de 304 mm, il est surestimé d'environ 32 mm par le modèle IPSL et de 36 mm par le modèle NCC. On pourrait affirmer que les deux MCRs se rapportent bien aux observations. Au niveau de la station de Daloa, le modèle ICHEC surestime le cumul pluviométrique en septembre de 93 mm par rapport à l'observation qui est de 170 mm. Quant au modèle NCC, il décale le pic de la pluviométrie de la station de Daloa, d'un mois vers l'arrière (Aout). Concernant la température moyenne (Figure 16), le constat est que le modèle IPSL a tendance à surestimer l'observation en moyenne de 0,1°C à 2,7°C sur toute l'année à toutes les stations. Bien que les modèles simulent bien la tendance des températures moyennes observées, le modèle NCC et ICHEC sous-estiment les observations en moyenne de 0,2 à 2,7°C sur toute la saison au niveau des stations de la zone d'étude.

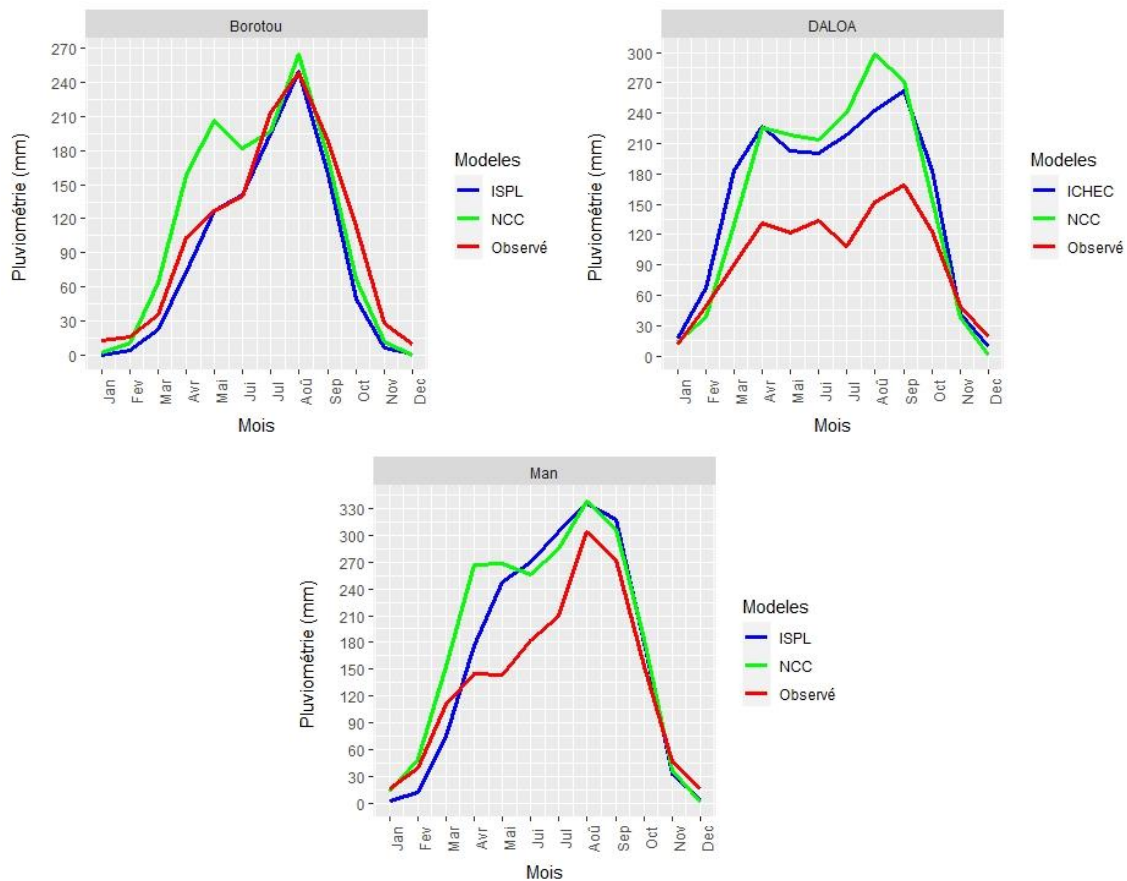


Figure 15 : Cycle saisonnier des précipitations moyennes mensuelles

Résultats et discussion

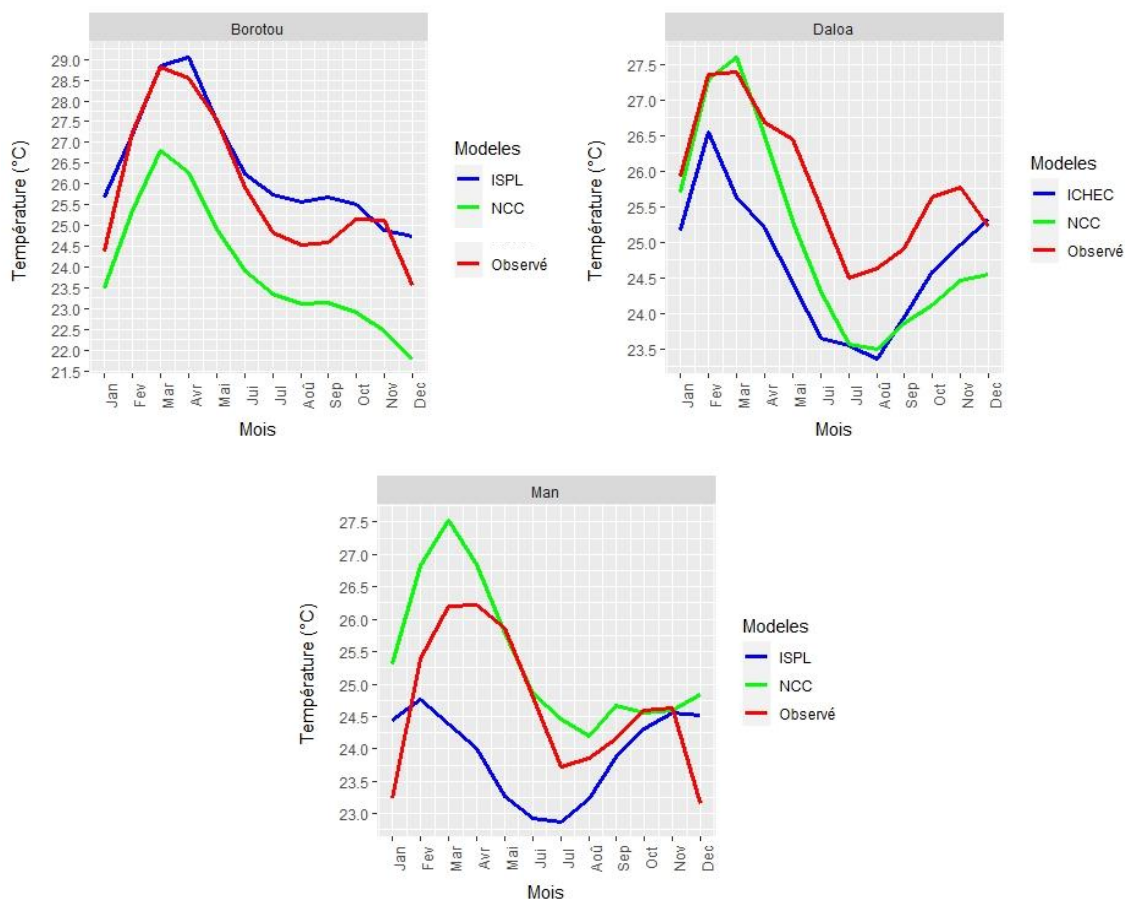


Figure 16 : Cycle saisonnier des températures moyennes mensuelles

3.1.3.2. Analyse des projections du cumul annuel des précipitations et des températures moyennes annuelles

🚩 Cas du Scénario RCP 4.5

En référence à la période de contrôle, les modèles projettent une augmentation du cumul des précipitations de +1 à +90% dans plus de 75% des cas sur les périodes 2021-2040, 2041-2060 et 2061-2080 à l'exception du modèle IPSL qui prévoit une baisse de -5 à -30% sur la période 2061-2080 à la station de Borotou (Figure 17). La spécificité de la période 2061-2080 à la station de Daloa est que le modèle ICHEC prévoit de fortes variations du cumul de précipitations annuelles. Les déviations de températures moyennes montrent que l'ensemble des MCRs projettent des hausses de +0,75 à +3,8°C sur la période 2021-2080 par rapport à la période de contrôle (1981-2005). Les hausses de températures seront plus importantes sur la période 2061-2080 et pourront atteindre les +3,8°C. (Figure 18).

Résultats et discussion

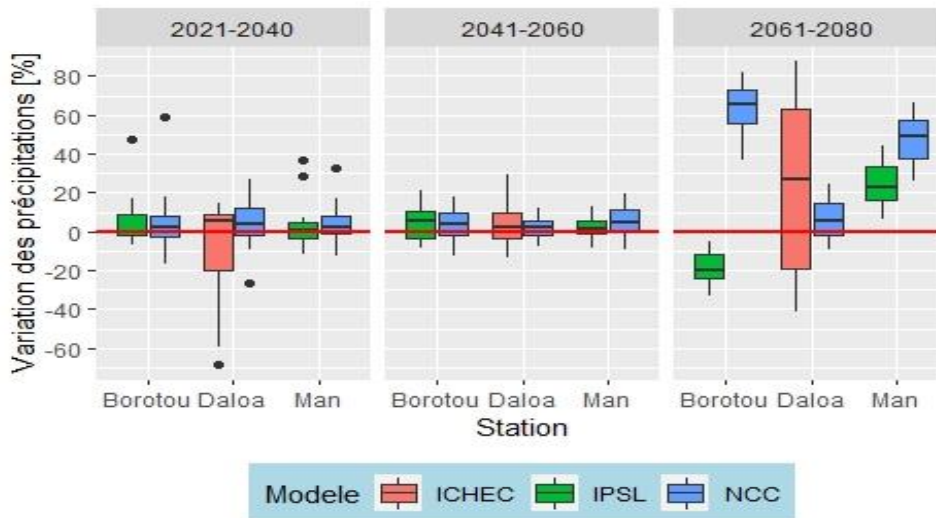


Figure 17 : Variation du cumul annuel des précipitations (cas du scénario RCP 4.5)

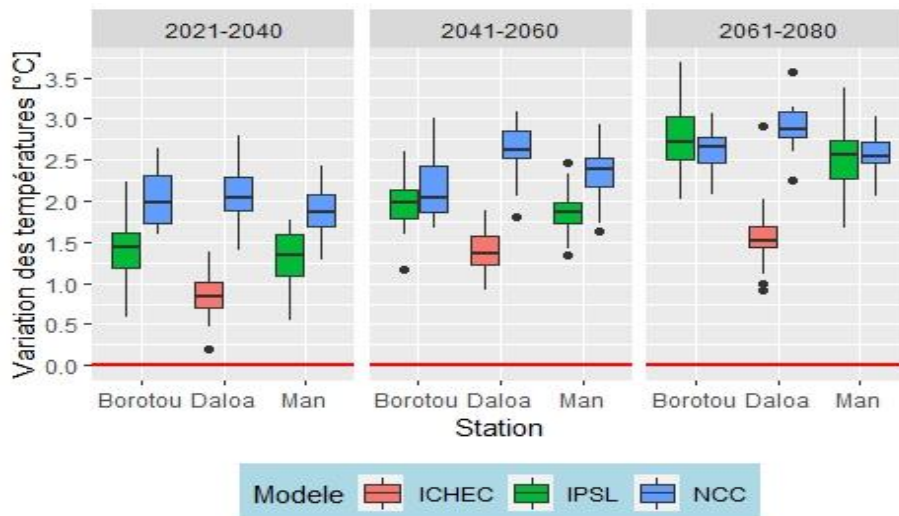


Figure 18 : Variation des températures moyennes annuelles (cas du scénario RCP 4.5)

✚ Cas du Scénario RCP 8.5

Sur les trois périodes, les MCRs à l'exception du modèle IPSL à la station de Borotou, projettent une hausse du cumul des précipitations de 1 à 91% dans plus de 75% des cas (Figure 19). Le modèle IPSL quant à lui, prévoit une baisse à la station de Borotou de -1 à -20% sur la période 2061-2080. Par ailleurs, pour les températures moyennes la tendance montre que l'ensemble des MCRs projettent des augmentations de +0,5 à +5,8°C sur les trois périodes étudiées, par rapport à la période 1981-2005. Les augmentations de températures seront plus importantes pendant la période 2061-2080 et vont atteindre les +5,8°C. Pour cet horizon, la particularité se situe à la station de Borotou où le modèle IPSL prévoit une hausse de +5,8°C (Figure 20).

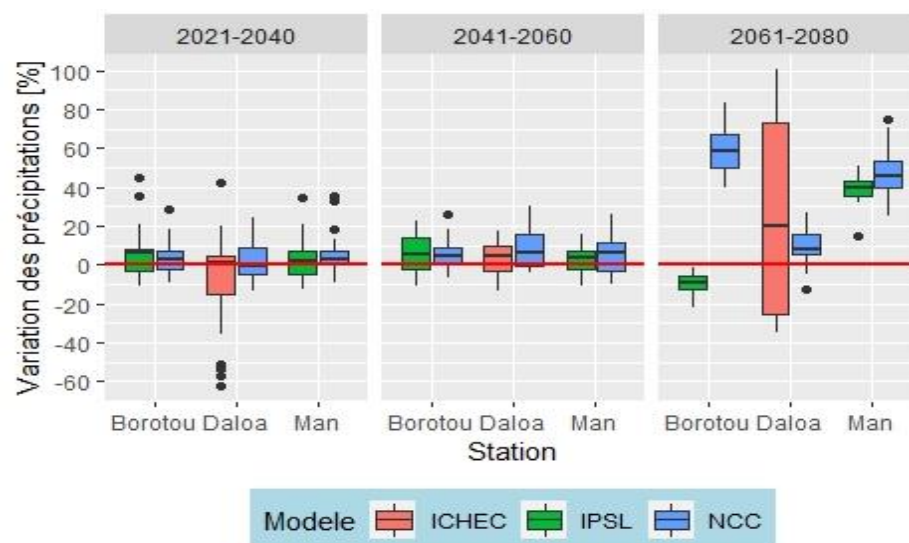


Figure 19 : Variation du cumul annuel des précipitations (cas du scénario RCP 8.5)

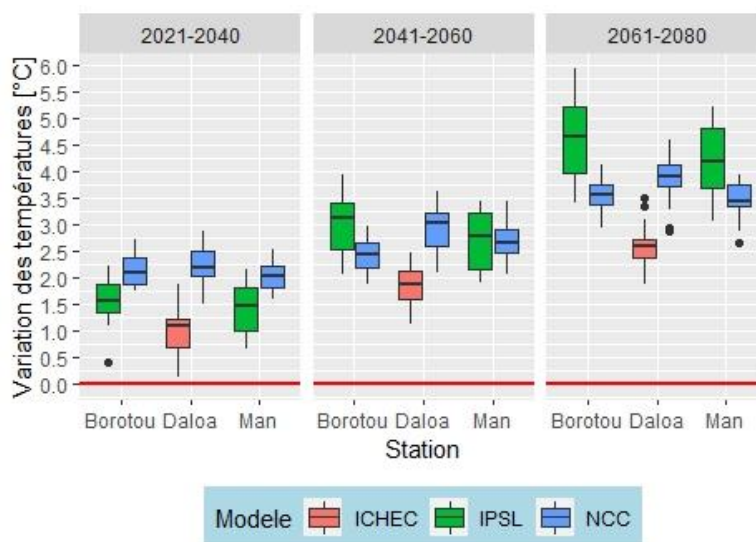


Figure 20 : Variation des températures moyennes annuelles (cas du scénario RCP 8.5)

3.1.4. Résultats du calage et de la validation du modèle GR2M

3.1.4.1. Performance du modèle

Le calage et la validation ont été respectivement effectués sur les périodes 1992-2000 et 1982-1991 pour le bassin du Sassandra à Buyo. A la fin des tests de calage et de validation du modèle GR2M, nous avons obtenu des résultats présentés dans le tableau VIII. Au calage, nous avons obtenu une Nash égale à 82,8% et à la validation, une valeur de Nash égal à 88,4%. On remarque que le critère de Nash au calage et à la validation est très satisfaisant.

Tableau IV: Caractéristiques du sous-bassin Buyo et des calages-validations du modèle GR2M

BASSIN	PARAMETRES		CALAGE		VALIDATION	
Sassandra à Buyo (39 890 km ²)	X1	X2	Période	Nash (%)	Période	Nash (%)
	7,14	0,61	1992-2000	82,8	1982-1991	88,4

3.1.4.2. Hydrogrammes du calage et validation du modèle GR2M

En calage, l'hydrogramme obtenu est très satisfaisant (Figure 21 A). L'évolution des écoulements est sensiblement identique, mais il existe un décalage (retard ou avance) entre l'hydrogramme simulé et l'hydrogramme observé. En validation, la concordance des écoulements est un peu dégradée (Figure 21 B).

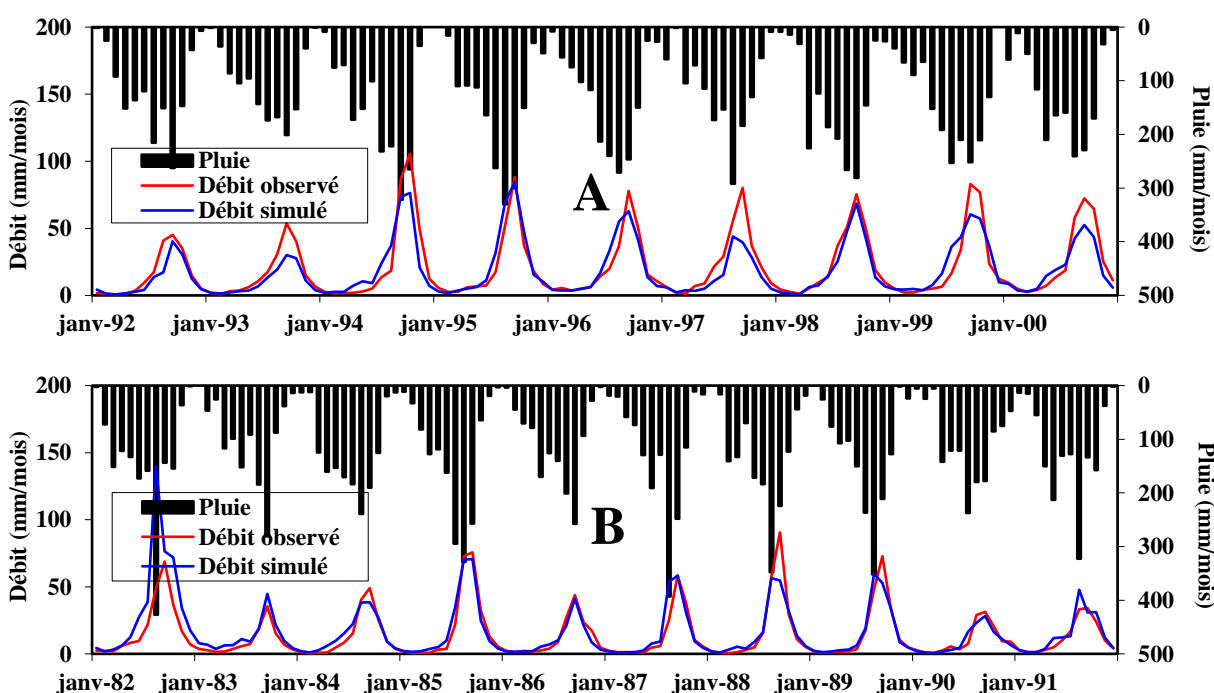


Figure 21 : Hydrogrammes des débits observés et simulés à la station de Buyo

3.1.4.3. Application des scénarii climatiques dans le modèle pluie débit

Le changement climatique a été étudié grâce aux différentes séries de précipitations et d'évapotranspiration potentielle mensuelles et de la lame d'eau écoulee sur le bassin. Ces données ont donc été utilisées en entrées du modèle GR2M pour simuler les écoulements sur le bassin versant du Sassandra à Buyo. Nous avons supposé que la relation entre les débits et les variables climatiques est identique à celle obtenue au cours du calage. Les paramètres du modèle ont donc été maintenus constants depuis le calage initial avec les données climatiques réellement mesurées,

pour les simulations aux horizons souhaités (2030, 2050 et 2070). Nous avons également maintenu les paramètres X1 et X2 pour générer les écoulements futurs sur le sous-bassin. Les valeurs de lames d'eau écoulées ainsi générées par le modèle peuvent être considérées comme des valeurs réalistes et peuvent être comparées aux observations pour évaluer les changements en termes de taux de variation, exprimé en pourcentage. Il faut rappeler que nous avons utilisé les données de projection du modèle climatique régional NCC, modèle Norvégien.

3.1.4.3.1. Evolution des débits moyens mensuels

L'examen des débits moyens mensuels des horizons 2030, 2050 et 2070 selon les deux scénarios, montre l'évolution de ceux-ci dans le temps (Figure 22). Il apparaît qu'il existe une assez bonne correspondance entre les régimes hydrologiques simulés sur les horizons selon les deux scénarios et ceux de la période de 1981-2000. En effet, le mois de septembre demeure le mois où se produit les pics de crues jusqu'à l'horizon 2070 à l'exception de l'horizon 2030 où l'on constate un déplacement du pic au mois d'Août au niveau du RCP 4.5. En termes de dynamique, il n'y a pas de modifications significatives du régime hydrologique : les périodes des basses eaux et des hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période 1981-2000. Toutefois, les modifications portent essentiellement sur les volumes d'eau écoulés et ce à tous les horizons et selon les deux scénarios.

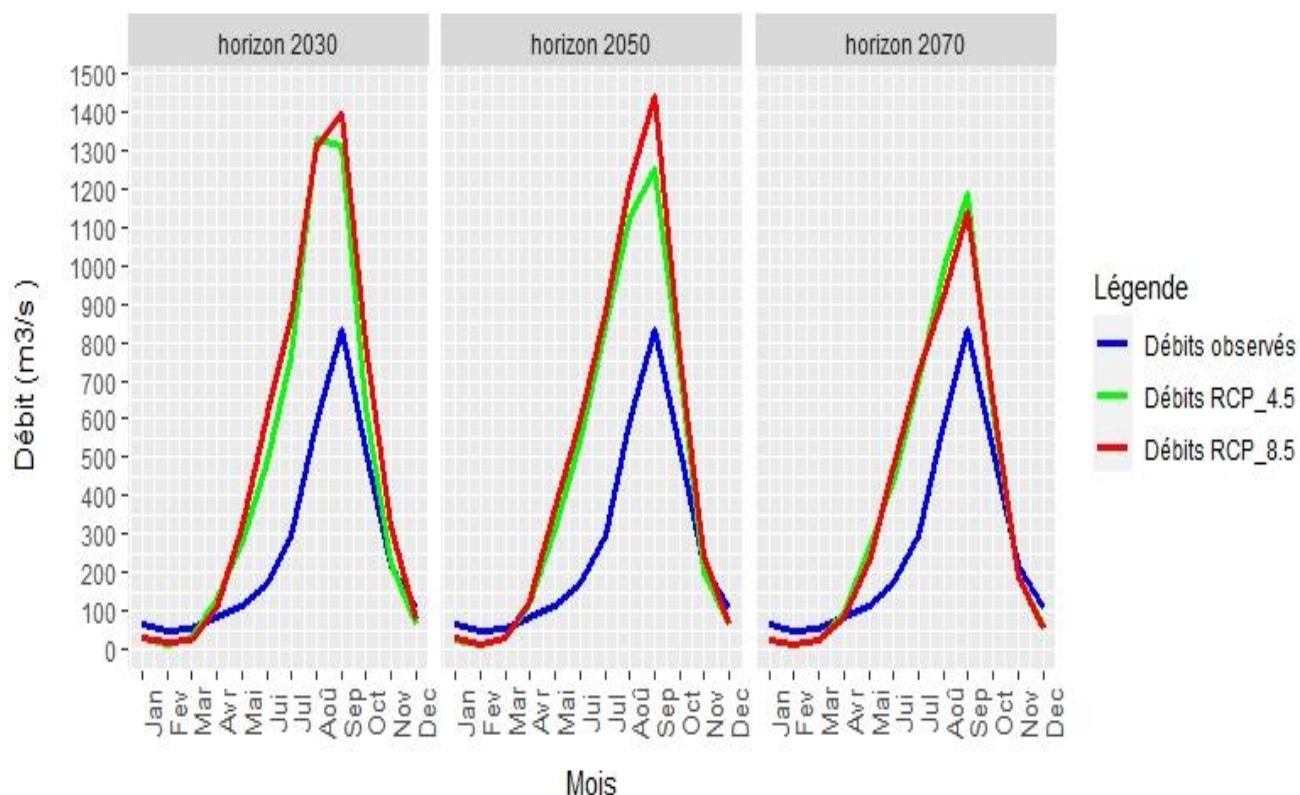


Figure 22 : Hydrogrammes moyens aux horizons 2030, 2050 et 2070 comparés à celui de la période (1981-2000) aux séries du modèle GR2M

3.1.4.3.2. Evolution des débits moyens annuels

Les taux de variations des débits moyens annuels montrent qu'il pourrait exister des hausses d'écoulements importants par rapport à ceux de la période 1981-2000 (Figure 23). Les écoulements moyens annuels attendus sur l'ensemble du bassin versant pourraient augmenter à l'horizon 2030 (Figure 23) de 71% selon le scénario RCP 4.5 soit une lame d'eau de 29 mm et de 90% selon le scénario RCP 8.5 soit une lame d'eau de 32 mm. Rappelons que le débit moyen observé sur la période 1981-2000 est de 258 m³/s soit une lame d'eau de 17 mm. Pour l'horizon 2050, le scénario RCP 4.5 prévoit une augmentation des débits moyens annuels de 70% soit une lame d'eau de 28 mm, le scénario RCP 8.5 quant à lui prévoit une augmentation de 86% soit une lame d'eau de 31 mm. Concernant l'horizon 2070, les écoulements les écoulements seront légèrement à la hausse par rapport aux autres horizons. Ainsi pour le RCP 4.5, une hausse de 49% (lame d'eau de 8,1 mm) sera observée. Le RCP 8.5 également prévoit une légère hausse de 46% (lame d'eau de 7,7 mm).

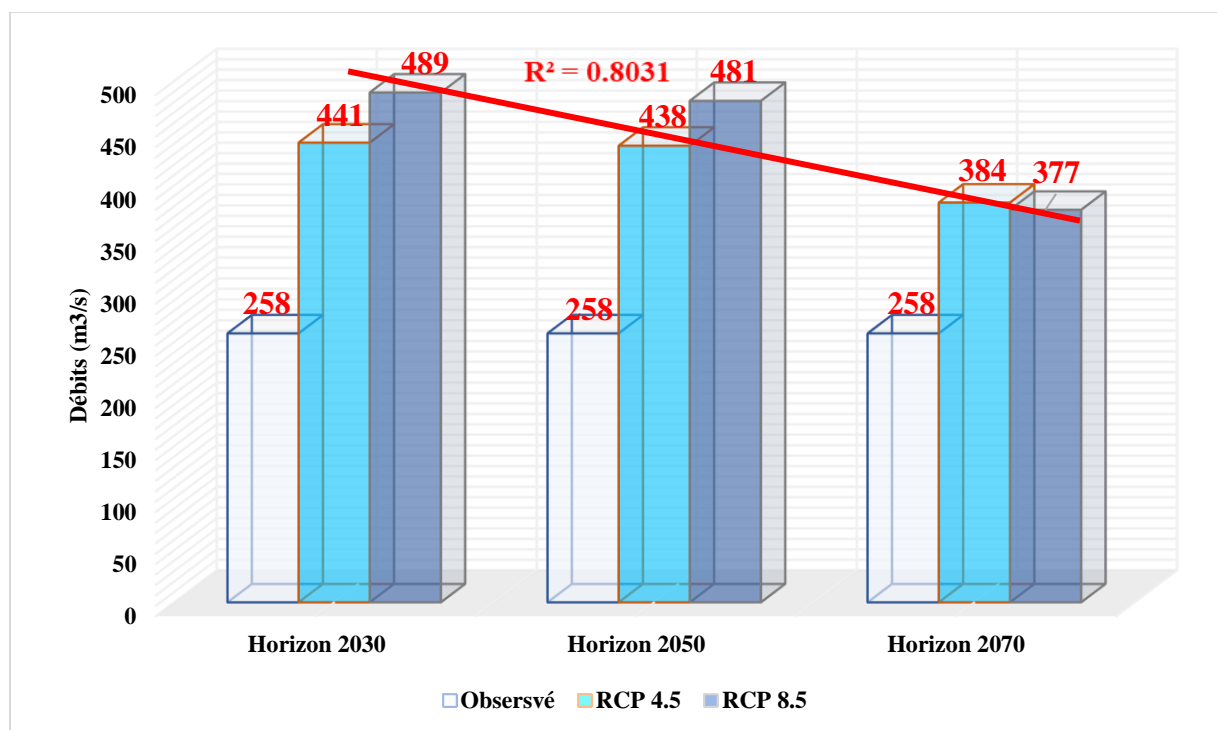


Figure 23 : Evolution de taux de variations des débits moyens annuels calculés aux deux horizons (2030, 2050 et 2070)

3.2. Discussion

L'analyse de la variabilité climatique montre que plusieurs modifications sont survenues dans le régime pluviométrique de toutes les stations de la zone d'étude. Ainsi, au cours de la période 1981-2010, une alternance entre des années pluviométriques excédentaires et déficitaires a été enregistrée. Cependant, les stations de Daloa et de Borotou présentent respectivement depuis 2005 et 2008, une ébauche de retour à la période humide. Quant à celle de Man, on constate un retour timide vers la période humide. Cette variabilité pluviométrique observée dans la zone est en accord avec les travaux de plusieurs scientifiques en l'occurrence ceux de Kouakou (2011) et de Yao (2015) qui ont montré l'existence de deux grandes périodes (humide et sèche) depuis les années 1970. Une étude menée par la SODEXAM en 2014 a également révélé que le climat en Côte d'Ivoire a connu beaucoup de fluctuations depuis les années 1950. Selon cette étude, les décennies 1950 et 1960 ont été relativement humides tandis que les décennies 1970 à 1990 ont été sèches. Brou *et al.*, (2005) ont noté 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

Résultats et discussion

1980 et 1990 avant de connaître une légère rémission dans les années 2000. Tous ces résultats confirment bien les résultats de nos travaux.

L'analyse des tendances du climat actuel a révélé également des baisses de précipitations et une hausse des températures qui ont eu lieu sur la période 1981-2010. A la station de Borotou et Daloa, à chaque décennie, on observe respectivement une baisse de 4% et 1% et une augmentation de 11% et 7% par rapport à la période de référence qui est la décennie 1981-1990. A la station Man, c'est plutôt des augmentations qui sont observées. Ces augmentations sont de 2 et 3%. Ces résultats traduisent bien qu'il y a eu une modification au niveau du bassin versant. Goula *et al.* (2006) ont en effet, montré que tous les bassins versants de la Côte d'Ivoire ont subi des modifications climatiques au cours de leur évolution. Cette modification s'est faite sentir sur les baisses des hauteurs de pluies et les hausses de températures. Au niveau des températures de la zone d'étude, la variabilité décennale a montré une unanimité au niveau de toutes les stations. On observe des augmentations à chaque décennie. Ces résultats sont corroborés par les résultats de l'étude de la SODEXAM menée en 2014.

Des résultats de la simulation du climat futur, il a été remarqué que tous les modèles de façon unanime, prédisent pour la zone, une hausse de la température moyenne aux horizons 2030, 2050 et 2070 quel que soit le scénario. De ce fait, il est prévu pour les modèles climatiques, une hausse de la température moyenne de +0,75 à +3,8 °C pour le scénario d'adaptation RCP 4.5 et +0.5 à +5,8 °C pour le scénario le plus pessimiste (scénario sans adaptation) RCP 8.5. A l'horizon 2070, le contraste thermique sera plus accentué. Globalement, si l'on se réfère aux variations moyennes de températures prévues par les différents modèles, on peut affirmer que notre zone d'étude enregistrera aux horizons 2030, 2050 et 2070, d'importants changements thermiques qui dépasseront ceux qu'elle a connus par le passé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Ardoin *et al.* (2005) sur le même bassin versant du Sassandra à Soubré et les résultats de Lawin *et al.* (2012) qui ont montré que selon les modèles globaux ECHAM et CNRM la température augmentera considérablement. De même les résultats de la déviation des températures vont dans le même sens que le rapport du GIEC, (2007) qui prévoit la hausse de la température moyenne entre 1980-1999 et 2080-2099 sur l'ensemble du continent et 1,5 fois plus qu'au niveau mondial. Au niveau des précipitations, une fluctuation du cumul annuel des précipitations dans une plage de +1 à +91% dans le bassin est attendue. Ces résultats sont en phases avec beaucoup d'études réalisées dans la zone sahélienne qui envisagent une augmentation des précipitations dont celle de Ardoin *et al.* (2005) qui ont montré une augmentation des précipitations sur le bassin versant du Sassandra à Soubré.

Résultats et discussion

Les résultats présentés par le modèle GR2M montrent que lors du calage et de la validation, le modèle sous-estime peu les débits de crues. Cela est dû à deux facteurs : les contrastes climatiques et la non prise en compte des états de surface du bassin versant (occupation du sol, barrages hydroagricoles). Des nombreux travaux (Goula, 1993 ; Servat & Sakho, 1995 ; Brou *et al.*, 1998) relatifs à l'aptitude des bassins versants à drainer les lames d'eau, ont montré que les principaux facteurs sont la nature géologique du substratum, le couvert végétal, la pente et les indices de compacité. Ces caractéristiques n'ont pas toutes été prises en compte dans le modèle.

Les écoulements moyens annuels sur le bassin versant pourraient augmenter de 12 mm à l'horizon 2030 soit une hausse de 71% selon le scénario RCP 4.5 et de 15 mm ; soit une hausse de 90% selon le scénario RCP 8.5. À l'horizon 2050, les écoulements moyens annuels sur le bassin versant augmenteront également de 12 mm à soit une hausse de 70% selon le scénario RCP 4.5 et de 14 mm soit une hausse de 86% selon le scénario RCP 8.5. Ces résultats sont en phases avec ceux des travaux de Ardoin *et al.* (2005) qui ont montré que les écoulements pourraient varier dans le futur suivant celles des précipitations ce qui entrainera une hausse des écoulements sur le bassin versant du Sassandra.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Sassandra à Soubré. Pour mener à bien ce travail nous nous sommes fixés trois objectifs spécifiques. Le premier a consisté à déterminer les modèles climatiques régionaux qui reproduisent au mieux le climat du bassin. Le second s'est basé sur le choix des modèles pour simuler le climat futur aux horizons 2030, 2050 et 2070 à travers deux scénarios le RCP4.5 et le RCP8.5. Et enfin, le troisième a consisté à déterminer l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin à partir d'un modèle et selon les scénarios et les horizons.

La détermination des MCRs qui simulent bien la saisonnalité de la zone d'étude, passe avant tout par la détermination de la variabilité climatique et les tendances actuelles du climat. La variabilité climatique a révélé l'existence de deux périodes (sèche et humide) au niveau de toutes les stations de la zone d'étude. Elle a aussi montré un retour vers la période humide. Quant à l'analyse des tendances actuelles, il apparaît clairement une hausse de température comprise dans la plage de +0.06 à +0.39°C à chaque décennie et à chaque station en fonction de la décennie 1981-1991. La détermination des MCRs a montré que seuls les modèles ICHEC, IPSL et NCC simulent bien le régime pluviométrique de la zone d'étude mais avec des biais significatifs. Aussi, faudrait-il souligner que le modèle NCC simule bien la climatologie des trois stations de la zone d'études Il faut noter que tous les modèles simulent bien le régime saisonnier des températures mais des écarts de sous-estimation allant jusqu'à -2°C et des écarts de surestimation allant jusqu'à +1.5°C sont observés.

La simulation du climat futur par les modèles a montré des variations des paramètres climatiques. En effet selon le scénario RCP 4.5, la pluviométrie pourrait augmenter respectivement de +1 à +91% sur les trois horizons (2030, 2050 et 2070). Les MCRs, selon le scénario RCP 8.5 prédisent une hausse de la pluviométrie sur les trois horizons de 1 à 91%. Tous les modèles prévoient une hausse de la température selon les deux scénarios de +0.75 à +3,8°C pour le RCP 4.5 et de +0,5 à +5,8°C jusqu'à l'horizon 2070. 2070 sera le plus chaud des trois horizons étudiés.

Les impacts futurs sur le bassin sont quelque peu positifs dans la mesure où le modèle NCC prévoit que des hausses de lame écoulée. Les écoulements moyens annuels attendus sur l'ensemble du bassin versant pourraient augmenter à l'horizon 2030 de 29 mm selon le scénario RCP 4.5 et de 32 mm selon le scénario RCP 8.5. Pour l'horizon 2050, le scénario RCP 4.5 prévoit une augmentation de 28 mm, le scénario RCP 8.5 quant à lui prévoit une augmentation de 31 mm. A l'horizon 2050,

Conclusion

les écoulements ont une tendance à la baisse selon les deux scénarios. Concernant l'horizon 2070, les écoulements seront légèrement à la hausse par rapport aux autres horizons. Ainsi pour le RCP 4.5, une hausse de 49% (lame d'eau de 8,1 mm) sera observée. Le RCP 8.5 également prévoit une légère hausse de 46% (lame d'eau de 7,7mm). Cependant, il faut noter que nos résultats proviennent d'un seul modèle pluie-débit (GR2M) qui est un modèle global et d'un seul jeu de données climatiques (CORDEX-Africa), donc ne permettent pas de cerner avec précision toutes les incertitudes ; mais déjà, ils donnent des indications sur les conséquences des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin du Sassandra à Soubré. Les limites de cette étude nous amènent à formuler les perspectives de recherche suivantes :

- prendre en compte les autres paramètres climatiques tels que : la température Tmax et Tmin, l'humidité relative, la radiation solaire afin de mieux appréhender les effets de la variabilité climatique ;
- utiliser les sorties du modèle climatique régional NCC en corrigeant ses biais pour mieux approcher les valeurs des paramètres climatiques de la période de référence sur le bassin du fleuve Sassandra ;
- évaluer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et sur la production d'électricité des barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré à l'aide de modèle distribué.

RÉFÉRENCES

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.
- 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.
- 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 Montpellier II (Montpellier, France), 440 p.
- Ardoin B.S., Dezetter A., Servat E., Mahe G., Paturel J.E., Dieulin E. & Casenave L. (2005). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change Hydroclimatic Variability*, 292 : 1-9.
- Baghdadli I. (2014). L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch. Mémoire de master. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen (Algérie), 89 p.
- Boe J. (2007). Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France. Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 67 p.
- 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.
- Brou T., Servat E. & Paturel J.E. (1998). Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. *International Association of Hydrological Sciences*, 252 : 365-373.
- Brou Y.T., Akindès F. & Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*, 14(6): 8.
- Camus H. (1969). Hydrologie du bassin du Sassandra (Note préliminaire). *Centre O.R.S.T.O.M, d'Adiopodoumé-Côte d'Ivoire, Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer*, 5(69) : 1-54.
- Covey C., AchutaRao K.M., Cubasch U., Jones P., Lambert S.J., Mann M.E., Phillips T.J., Taylor K.E. (2003). An Overview of Results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Global Planet Change*, 37 : 103-133.
- Djè K.B. (2014). Document de strategie du programme national changement climatique (2015-2020), Abidjan, Côte d'Ivoire, 71 p.
- FAO (2018). Renforcer la résilience pour atténuer la vulnérabilité extrême de l'agriculture et des moyens d'existence ruraux en Afrique, 9 p.
- Gates W.L., Boyle J.S., Covey C., Dease C.G., Doutriaux C.M., Drach R.S., Fiorino M., Gleckler P.J., Hnilo J.J., Marlais S.M., Phillips T.J., Potter G.L., Santer B.D., Sperber K.R., Taylor K.E., Williams D.N. (1999). An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 80 : 29-55.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur

Références

- l'évolution du climat, Rapport de synthèse. *International*, 23-24 novembre 2005, pp 5-36.
- Girard G. & Sircoulon J. (1968). Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. Centre O.R.S.T.O.M, d'Adiopodoumé-Côte d'Ivoire, *Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer*, 5(69) : 1-54.
- Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf P. (1970). Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire. *Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer* : 56 p.
- Goula B.T.A. (1993). Modélisation hydrologique de bassins versants équipés d'ouvrages hydrauliques en zone soudano-sahélienne : Application au Massili (Burkina Faso). Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure des Mines de Paris (Paris, France), 178 p.
- Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *VertigO, La revue en sciences de l'environnement*, 7(1) : 20-24.
- Jones C., Giorgi F. & Asrar G. (2011) The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX—an international downscaling link to CMIP5. *Clivar Exch*, 56 : 34–40.
- Kabouya M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 p.
- Kadio E. (1989). Etudes géologiques et géochimiques des occurrences nickélicifères, super gènes au Nord-ouest de Biankouma (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 270 p.
- Konan B. (2001). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra à Soubré. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 182 p.
- Konan K.S., Kouassi K.L., Konan K.F., Kouamé K.I., Aka K. & Gnakri D. (2013). Solid load estimating and hydrochemical characterization of the lake of the hydroelectric dam of Ayamé 1 (Ivory Coast). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, (35) : 17–25.
- Kouakou K.E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 170 p.
- Kouame K. F. (2011). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL," Thèse d'Etat ès sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 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 Unique, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Lavabre J., Sempere T. D. & Cernesson F. (1993). Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142 : 273-299.
- Lawin E.A., Akponikpè P.B.I., Jalloh A. & Thomas T.S. (2012). West African Agriculture and

Références

- Climate Change, Bénin. *International Food Policy Research Institute*, 2: 1-2.
- Makhlouf Z. & Michel C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162 : 299-318.
- Mory K.J. (2020). Caractérisation de la variabilité climatique du bassin du fleuve Sassandra à Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master, Option : Génie de l'Eau et de l'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guede (Daloa, Côte d'Ivoire), 50p.
- Mouehli S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Cemagref (Antony), Université Paris VI, 323 p.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C. et Andréassian V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318 (4) : 200-214.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3) : 282-290.
- 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. *Vertigo*, 71 : 1-71.
- 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 (Montpellier ; France), 258 p.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p.
- Perrin C., Michel C. & Andréassian V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés Parc de Tourvoie , 16 : 1-16.
- Rakotondrabe F. (2007). Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21 : cas du bassin versant de Morondava (Sud-ouest de Madagascar). Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo école supérieure polytechnique d'Antananarivo (Madagascar), 87.
- Rivard C., Marion J., Michaud Y., Benhammane S., Morin A., Lefevre R., & Rivera A. (2003). Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, *Commission géologique du Canada, dossier public 1577*, 39 : 1-39.
- 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. & Sakho M. (1995). Méthodologie simplifiée d'évaluation comparative des performances d'un système d'eau aménagé confronté à la sécheresse : exemple de l'aménagement du Sassandra en Côte d'Ivoire. *IAHS Publication*, 231: 61-69.
- Servat E., Paturol J.E., Lubes-niel H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M. & Marieu B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2) : 363-387.

Références

- Sorokoby V.M. (2013). Étude hydrogéologique et hydrologique de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique : Apport de la Télédétection, de la Modélisation Hydrologique et des SIG. Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 198 p.
- Steffen W. & Tyson (2001). Global change and the Earth System: A planet under pressure. *Stockholm, IGBP* : 1-32.
- Tarik B.A. (2006). Modélisation pluie-débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (Application aux bassins algériens). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique d'Alger (Alger, Algérie), 222 p.
- Taylor K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research*, 106 : 83-92.
- 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, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yéo N.S. (2020). Caractérisation de la variabilité hydrologique du fleuve Sassandra au barrage hydroélectrique de Soubré (Sud-ouest, Côte d'Ivoire). Mémoire de Master, Option : Génie de l'Eau et de l'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guede (Daloa, Côte d'Ivoire), 50p.
- 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.
- Zhang X. & Yang F. (2004). Manuel d'utilisation de Rclimdex. Direction de la recherche climatique /Environnement de Canada. *Downsview*, 13 : 1-13.

RÉSUMÉ

En Côte d'Ivoire, la production de l'énergie électrique reste tributaire des grands cours d'eaux et des aléas climatiques. Les barrages hydroélectriques de Buyo et de Soubré produisent plus de la moitié de la production nationale d'électricité avec 440 sur 879 MW. Ces grands ouvrages sont ainsi menacés par ces changements du climat. Ce présent document porte sur l'évaluation des signaux des changements climatiques projetés sur le bassin versant du Sassandra à Soubré à partir des projections régionales (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Les données de sorties de 10 MCRs du programme CORDEX ont été utilisées. Parmi les dix modèles, les MCRs ICHEC, IPSL et NCC ont été choisis sur la base des critères du diagramme de Taylor et du profil saisonnier de la température et de la pluviométrie pour la simulation du climat futur. Les résultats ont montré que selon tous les MCRs et suivants les scénarios et les horizons, une hausse de la température moyenne de +0,5 à +5,8°C sera observée. En outre, les précipitations pourraient augmenter de +1 à +91% selon les deux RCP jusqu'à l'horizon 2070. Le modèle NCC, vu sa corrélation avec les trois stations, a permis la simulation des écoulements futurs. Les résultats montrent que les écoulements moyens annuels attendus sur l'ensemble du bassin versant pourraient augmenter à l'horizon 2030 de 29 mm (RCP 4.5), de 32 mm (RCP 8.5). A l'horizon 2050, il est prévu une hausse de 28 mm (RCPB 4.5), et une hausse de 31 mm (RCP 8.5). En outre, à l'horizon 2070 une hausse de 8,1 mm (RCP 4.5), et une hausse de 7,7 mm (RCP 8.5) sera observée.

Mots-clés : Modèles climatiques régionaux (MCRs), changement climatique, bassin versant du Sassandra.

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, the electric power production remains dependent on large rivers and climatic hazards. Buyo and Soubré hydroelectric dams produce more than half of the national electricity production with 440 out of 879 MW. These large structures are thus threatened by these changes in the climate. This document concerns the evaluation of the climate change signals projected on the Sassandra watershed in Soubré based on regional projections (South-West of Côte d'Ivoire). The output data of 10 MCRs from the Cordex program was used. Among the ten MCRs, ICHEC, IPSL and NCC MCRs were chosen based on the criteria of the Taylor diagram and the temperature seasonal profile and rainfall for the future climate simulation. The results showed, according to all the RCMs and following scenarios and horizons, an increase in the average temperature from +0.5 to + 5.8 °C will be observed. Moreover, precipitation could increase by +1 to + 91% according to the two RCPs until 2070. NCC model, given its correlation with the three stations, allowed the simulation of future flows. The results show that the average annual flows expected over the entire watershed could increase by 2030 by 29 mm (RCP 4.5), by 32 mm (RCP 8.5). By 2050, an increase of 28 mm (RCPB 4.5), and an increase of 31 mm (RCP 8.5) is expected. In addition, by 2070 an increase of 8.1 mm (RCP 4.5), and an increase of 7.7 mm (RCP 8.5) will be observed.

Keywords: Regional climate models (RCMs), climate change, Sassandra watershed.