

UNIVERSITÉ ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Modélisation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bafing (Haut Bassin du fleuve du Sénégal)

Présenté par **Ibrahima Thiam GAYE**

Sous la direction de **Dr Mamadou Lamine MBAYE**

Soutenu publiquement le 16 Mai 2022 devant jury composé de :

Qualité du Jury	Nom et Prénom(s)	Grade	Établissement
Président	CAMARA Moctar	Professeur titulaire	UASZ/UFR-ST
Rapporteur	FAYE Cheikh	Maitre de conférences	UASZ/UFR-ST
Examineur	DIATTA Samo	Maitre de conférences	UASZ/UFR-ST
Examineur	DIATTA Joseph Sambaséne	Maitre-Assistant	UASZ/UFR-ST
Encadrant	MBAYE Mamadou Lamine	Maitre-Assistant	UASZ/UFR-ST



Dédicaces

Je rends grâce à Allah, le Clément, le Miséricordieux pour m’ avoir accordé la santé, la force et le courage nécessaire pour accomplir ce travail.

Je dédie ce travail, à toute ma famille. Particulièrement

À mon cher Père : Mamadou Gaye

À ma chère et adorable Mère : Maimouna Ba

À ma chère épouse : Fatou Oumar Thiam

À mon feu oncle : Serigne Aliou Lo (ancien Professeur de Mathématique à UCAD)

À ma feu tante : Seynabou Gaye

À mes frères : Daouda Diankha, Samba Gaye, Mamadou Diakhaté, Pape Birane Diankha Gaye, Sidiya Ndiaye, Boubacar Gaye, Massamba Sall Diakhaté Gaye, Pape Sassy Gaye etc.

À mes sœurs : Ndiaye Diassé Gaye, Ndeye Fatou Gaye, Mariama Gaye, Seynabou Gaye, Yaye Penda Thiam Gaye etc.

A mon oncle : Alioune Ba

A mon meilleur ami : Makhtar Gueye

A mon cher enseignant au lycée : Mr Saer Mbathie

A mes cousins : Fatou Thiam, Coumba Diankha, Babou Thiam, Seynabou Diankha, Pathé Diankha, Awa Thiam etc.

À mes amis : Landing Tamba, Ousmane Mbow, Ababacar Thiam, Ismaila Ba, Amath Kouta, Mbaye Kouta, Amadou Biteye, Yaya Kane, Adja Thiam, Sokhna Diarra Bousso Diouf, Ndeye Khady Sylla, Fatoumata Diop Gassama, etc.

À tous mes nièces et neveux

À mes ami (e) s, mes camarades de promotion, mes « anciens », mes professeurs et à tous les étudiants et étudiantes de SAO

Remerciements

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Ce travail a été effectué à l'université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ), au Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat (LOSEC) et au Laboratoire de physique de l'atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO_SF).

Avant de présenter les résultats du travail, il est important pour moi de témoigner ici une grande reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à son aboutissement. Je tiens sincèrement à remercier : en premier lieu, le cher Docteur Mamadou Lamine Mbaye, une personne humble, sérieuse, travailleur, mon encadreur à qui j'exprime toute ma reconnaissance pour avoir accepté de conduire ce mémoire malgré ses multiples occupations. Pour votre confiance en mon travail, votre patience, vos nombreux conseils, votre disponibilité, veuillez trouver ici, l'expression de ma sincère et profonde gratitude ;

Je remercie également les membres du jury : Pr Moctar Camara (Président), Dr Cheikh Faye (Rapporteur), Dr Samo Diatta (Examineur), Dr Joseph Sambahène Diatta (Examineur), d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je remercie également tous les enseignants du département de Physique et les chercheurs du LOSEC ;

Je remercie aussi M. Assane Ndiaye, M. David Sagna, Mlle Khadidiatou Sy pour avoir accepté de me guider et de m'orienter dans le travail malgré leurs multiples occupations vous avez toute ma reconnaissance. Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les docteurs et doctorants et chercheurs du laboratoire physique de LOSEC et LPAO_SF : Dr Ibrahima Diba, Dr Alioune Badara Sarr, Dr Cheikh Modou Noreyni Fall, Dr Aissatou Faye, Mr Hamady Ngansou Sabaly, Mr Jules Basse, Mr Cheikh Waly Diédhiou, Mr Birane Ndom, Mr Pierre Malang sadio , Mr Dioumacore Faye, Mr Amadou Diouf, , Mme Fatou khoulé pour tous leurs conseils et aides.

Je ne saurais terminer sans pour autant remercier toute la promotion de la SAO 2018 (Cheikh Faye, Issa Ba, Souleymane Thiam, Makhary Niass, Massamba Diouf, Raoul Sylva, Pape Mar éne, Edouard Badiate Diedhiou et Massara Diakhaté) qui a été une deuxième famille durant toute cette formation. J'adresse des remerciements particuliers à ma famille pour m'avoir toujours poussée à poursuivre mes études. Je suis très reconnaissant à ma mère de m'avoir donné une bonne éducation. Un grand merci à mon Père Mamadou Gaye qui a toujours fait confiance sur mes études, il m'a soutenu dans tous les domaines. Je voudrais aussi remercier ma très chère et adorable épouse qui m'a toujours soutenu, mes frères et sœurs qui m'ont toujours aidé : Mamadou Diakhaté, Pape Diankha Gaye, Sidiya Ndiaye et Massamba Gaye.

Liste des Acronymes

HBS : Haut Bassin du fleuve Sénégal

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

GIEC : Groupe D'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

CCNUCC : Conférence Cadre des Nation Unies sur les Changements Climatiques

GES : Gaz à Effets de Serre

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.

PAS-PNA : Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation

CPDN : Contributions Prévues Déterminées au niveau National

IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

ETP : Évapotranspiration Potentielle

FAO : Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture

GR1A : Génie Rural à 1 paramètre Annuel

GR2M : Génie Rural à 2 paramètres Mensuels

GR4J : Génie Rural à 4 paramètres Journaliers

GR5J : Génie Rural à 5 paramètres Journaliers

GR6J : Génie Rural à 6 paramètres Journaliers

HU : Hydrogramme Unitaire

IRSTEA : Institut national de Recherche en Science et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture

IRI : Institut International de Recherche sur le climat et la société

SSP : Shared Socioeconomic Pathways

Résumé

Les chroniques de débit du haut bassin du fleuve Sénégal et de sa partie guinéenne sont souvent lacunaires, discontinues, de courte durée, et donc difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. En effet, il n'est pas toujours possible de disposer de séries chronologiques longues de débits observés permettant une évaluation adéquate des ressources en eau de surface. La modélisation pluie-débit s'intéresse principalement au fonctionnement du cycle hydrologique au niveau d'un bassin versant à différentes échelles spatio-temporelles. L'objectif de notre travail est de modéliser les impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de Bafing en se basant sur le modèle hydrologique GR4J (Génie Rural 4 paramètres Journaliers). La méthodologie appliquée consiste à calibrer et valider le modèle GR4J avant de simuler l'évolution future des débits dans le bassin versant du bafing sous les scénarios climatiques SSP245 et SSP585. Les procédures de calage et de validation du GR4J ont été effectuées avec des données de pluie, d'ETP et des débits observés sur la période de 1981 à 2010. Les sorties de six modèles climatiques globaux issus du projet de CMIP6 (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 et FGOALS) ont été corrigées avant d'être utilisées comme forçage du modèle GR4J pour simuler les écoulements futurs. Les résultats montrent que le modèle GR4J reproduit d'une manière satisfaisante la forme des hydrogrammes observés. Les débits de pointes calculés sont bien situés dans le temps même s'ils sont parfois sous-estimés ou surestimés. Les projections climatiques révèlent une hausse de la température et de l'ETP, qui se renforcera davantage dans le futur sous les SSP245 et SSP585. Pour la pluviométrie, certains modèles prévoient une augmentation et d'autres une diminution et la moyenne d'ensemble de ces modèles prévoit une diminution des précipitations sous le scénario SSP585 et une légère augmentation sous le scénario SSP245 aux horizons 2050 et 2090. Quant aux écoulements futurs, une tendance à la baisse des débits moyens annuels et mensuels est prévue au niveau des deux sous bassins du Bafing (Daka Saidou et Bafing Makana) sous les deux scénarios. Cette baisse est plus prononcée à Daka Saidou qu'à Bafing Makana. Ces résultats pourraient aider les décideurs, les agriculteurs et les éleveurs à mieux planifier et orienter les activités socio-économiques afin de réduire les risques liés aux impacts négatifs du changement climatique et d'augmenter leur résilience.

Mots-clés : Bassin du Bafing, changements climatiques, modèle GR4J, débits, pluviométrie, température, évapotranspiration.

Abstract

The flow records of the upper basin of the Senegal River and its Guinean part are often incomplete, discontinuous, of short duration, and therefore difficult to use for a reliable hydrological analysis. Indeed, it is not always possible to have long chronological series of observed flows allowing an adequate evaluation of surface water resources. Rainfall-runoff modeling is mainly interested in the functioning of the hydrological cycle at the level of a catchment area at different spatio-temporal scales. The objective of our work is to model the impacts of climate change on the water resources of the Bafing watershed based on the hydrological model GR4J (Agricultural Engineering 4 Daily Parameters). The methodology applied consists in calibrating and validating the GR4J model before simulating the future evolution of flows in the Bafing catchment area under the SSP245 and SSP585 climate scenarios. The GR4J calibration and validation procedures were carried out with rainfall, ETP and flow data observed over the period from 1981 to 2010. The outputs of six global climate models from the CMIP6 project (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 and FGOALS) were corrected before being used as a forcing of the GR4J model to simulate future flows. The results show that the GR4J model satisfactorily reproduces the shape of the observed hydrographs. The calculated peak flows are well located in time even if they are sometimes underestimated or overestimated. Climate projections reveal a rise in temperature and ETP, which will further strengthen in the future under SSP245 and SSP585. For rainfall, some models predict an increase and others a decrease and the overall average of these models predicts a decrease in precipitation under the SSP585 scenario and a slight increase under the SSP245 scenario for the 2050 and 2090 horizons. As for future flows, a downward trend in average annual and monthly flows is expected at the level of the two Bafing sub-basins (Daka Saidou and Bafing Makana) under the two scenarios. This decline is more pronounced in Daka Saidou than in Bafing Makana. These results could help decision-makers, farmers and herders to better plan and direct socio-economic activities in order to reduce the risks associated with the negative impacts of climate change and increase their resilience.

Keywords: Bafing basin, climate change, GR4J model, flows, rainfall, temperature, evapotranspiration.

Liste des Figures

Figure 1: Structure d'un Bassin versant (http://www.cig.ensmp.fr).....	4
Figure 2 : Localisation du bassin versant de Bafing.....	9
Figure 3: Densité du couvert forestier du haut bassin en 2005 (Source : Laliberté, 2008).....	13
Figure 4 : Localisation des stations utilisée	14
Figure 5 : Variation interannuelle des SPEI	20
Figure 6 : Structure du modèle GR4J (Mbaye., et al,2020)	24
Figure 7 : Méthode de split sample test (Klemeš, 1986).....	27
Figure 8 : Hydrogrammes moyens journaliers observés et simulés en période de calage	31
Figure 9 : Hydrogrammes moyens journaliers observés et simulés en période de validation	31
Figure 10: Cycle saisonnier de la précipitation et de la température avant et après la correction des biais	34
Figure 11: Cycle saisonnier de la Précipitation simulée par les six modèles sous le SSP245	35
Figure 12 : Cycle saisonnier de la Précipitation simulées par les six modèles sous le SSP585	36
Figure 13 : Cycle saisonnier de la Précipitation simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles sous les deux scénarios (SSP245 et SSP585).....	37
Figure 14 : Cycle saisonnier de la température simulées par les six modèles sous le SSP585.....	38
Figure 15 : Cycle saisonnier de la température simulées par les six modèles sous le SSP245.....	38
Figure 16 : Cycle saisonnier de la température moyenne simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles sous les ssp245 et ssp585	39
Figure 17 : Cycle saisonnier de l'ETP simulées par les six modèles avec le ssp245.....	40
Figure 18 : Cycle saisonnier de l'ETP simulées par les six modèles avec le ssp585	40
Figure 19 : Cycle saisonnier de l'ETP simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles.....	41
Figure 20 : Cycle saisonnier des débits simulés par les six modèles sous les ssp245 comparés avec l'historique dans le sous bassin de Bafing Makana.....	42
Figure 21 Cycle saisonnier des débits simulées par les six modèles sous les ssp585 comparés avec l'historique dans le sous bassin de Bafing Makana.....	42
Figure 22 : Cycle saisonnier des débits simulées par les six modèles sous les ssp245 comparés avec l'historique dans le sous bassin de Daka Saidou	43
Figure 23 : Cycle saisonnier des débits simulées par les six modèles sous les ssp585 comparés avec l'historique dans le sous bassin de Daka Saidou.....	43
Figure 24 : Cycle saisonnier des débits simulées par la moyenne d'ensemble des six modèles sous les ssp245 et ssp585 comparés avec l'historique dans les stations de Daka Saidou et de Bafing Makana.....	44

Figure 25 : Anomalies des températures, de l'ETP, Précipitations, et des débits Simulés avec la moyenne d'ensembles des six modèles MCG sous le SSP245 et SSP585. 45

Figure 26 : Évolution moyenne annuelles des débits simulés par le modèle GR4J avec la moyenne d'ensemble des six sorties des MCG sous le ssp245 et ssp585 comparés avec l'historique à station de Bafing Makana et de Daka Saidou..... 48

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Liste des stations et données d'observations utilisées.....	15
Tableau 2 : Données satellitaires utilisées.	16
Tableau 3 : Données de sortie de modèles climatiques.....	17
Tableau 4 : Norme de classification de la sécheresse basée sur le SPEI (Sané., et al 2020)	19
Tableau 5 : Les étapes de la méthode CDF-t (source : http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128).....	22
Tableau 6 : Performances du modèle avec KGE (Gupta et al., 2009).....	28
Tableau 7 : Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en calage	32
Tableau 8 : Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en validation	33
Tableau 9 : Changement sur les débits extrêmes dans la station de Bafing Makana	49
Tableau 10 : Changement sur les débits extrêmes dans la station de Daka Saidou	50

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Liste des Acronymes	iv
Résumé	v
Abstract.....	vi
Liste des Figures.....	vii
Liste des Tableaux.....	ix
CHAPITRE I : Généralités	3
I.1. Généralités sur le fonctionnement d'un bassin versant	3
I.2. Généralités sur les changements climatiques	4
I.2.1. Définitions	4
I.2.2. Causes des changements climatiques.....	4
I.2.3. Situation et impact des changements climatiques sur les ressources en eau.....	5
I.3. Généralité sur la modélisation hydrologique : Modélisation pluie débit.....	7
Chapitre 2 : Données et Méthodologie	9
II.1. Présentation de la Zone d'étude.....	9
II.1.1. Localisation du Bassin Versant du Bafing	9
II.1.2. Caractéristiques du Bassin versant de Bafing.....	10
II.1.2.1. Caractéristiques de forme	10
II.1.2.2. Géomorphologie	10
II.1.2.3. Hydrogéologie	11
II.1.2.4. Pédologie	11
II.1.2.5. Végétation.....	13
II.1.2.6. Climat	13
II.1.3. Localisation des stations utilisées.....	14
II.2. Présentation des Données hydro climatique.....	15
II.2.1. Données d'observation	15
II.2.2. Données de sortie de modèles climatique.....	16
II.3. Méthodologie.....	17
II.3.1. Méthode de calcul.....	18
II.3.1.1. Calcul de la pluie moyenne du bassin	18
II.3.1.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	18

II.3.1.3 Coefficient de ruissellement.....	18
II.3.1.4. Indice standardisé de précipitation et évapotranspiration (SPEI).....	19
II.3.1.5. Indice des débits extrêmes.....	20
II.3.1.6. Correction des Biais	22
II.3.2. Présentation du modèle hydrologique GR4J.....	23
II.3.2.1. Structure et fonctionnement du modèle GR4J	23
II.3.2.2. Calage et validation du modèle.....	27
II.3.2.3. Critère d'évaluation du modèle.....	28
Chapitre 3 : Résultats et Discussions	30
III.1. Calage et validation du modèle GR4J sur le Bafing.....	30
III.1.1. Hydrogramme observé et simulé pendant la période de calage	30
III.1.2. Hydrogrammes observés et simulés pendant la période de validation	31
III.1.3. Évaluation de la performance du GR4J.....	32
III.2. Cycle annuel de la précipitation et de la température avant et après la correction.....	33
III.3. Projections Hydroclimatiques	34
III.3.1 Cycle saisonnier de la Précipitation	35
III.3.2. Cycle saisonnier de la température moyenne	37
III.3.3. Cycle saisonnier de l'ETP	39
III.3.4. Cycle saisonnier des débits moyens	41
III.3.5. Changement sur les paramètres climatiques	44
III.3.6. Impacts du changement climatique sur les débits du Bafing	47
III.3.6.1 Tendances moyennes des débits futurs.....	47
III.3.6.2. Changement sur les débits extrêmes.....	49
Conclusion générale et perspectives	51
Bibliographie.....	53

Introduction Générale

Le réchauffement mondial provoque des modifications durables de notre système climatique, qui font peser une menace aux conséquences irréversibles (PNUD, 2018). Comptant parmi les zones les plus vulnérables, l'Afrique de l'Ouest est sans doute la région qui subira plus les impacts des changements climatiques, en raison notamment de sa situation économique, de sa forte croissance démographique et de la dépendance d'une frange importante de la population aux ressources naturelles (Noblet, et al,2018). Les impacts du changement climatique dans les secteurs de l'agriculture, ressources en eau, santé et les écosystèmes font l'objet d'une attention particulière et soulèvent l'inquiétude d'une proportion grandissante de la communauté internationale scientifique et les décideurs. Parmi ces impacts, ceux sur les ressources en eau suscitent beaucoup d'inquiétudes en ce qui concerne la disponibilité future de cette ressource vitale dans le monde. En Afrique de l'Ouest et au Sahel particulièrement, certaines études ont abordé la problématique de l'impact futur du changement climatique sur les ressources en eau. Au Sénégal, les impacts du réchauffement climatique global présentent des risques sérieux pour l'agriculture qui est principalement pluviale, les ressources en eau et les zones côtières qui sont déjà fragiles. Ces trois secteurs occupent une place importante dans l'économie nationale et leur sensibilité aux impacts des changements climatiques risque de remettre en question les objectifs du Plan Sénégal Émergent (CPDN, 2015). Compte tenu de cette vulnérabilité de ces ressources face à la variabilité du climat, l'évolution des ressources en eau devient une question préoccupante pour de nombreux bassins du fleuve Sénégal plus particulièrement dans le haut bassin.

Une zone enclavée où il n'est pas toujours possible de disposer de séries chronologiques de débits continues et longues sur un même site, permettant une détermination des ressources en eau ainsi qu'une connaissance et une prévision des situations extrêmes de crue ou d'étiage et de leurs risques d'occurrence. Selon Bodian et al. (2012), on assiste ainsi à une réduction du nombre de stations suivies, notamment à cause d'un manque de moyens humains et financiers dans la partie guinéenne tout particulièrement. Cependant la connaissance de la ressource en eau et de ses variations saisonnières présentent des faiblesses avec des séries de données hydrologiques tronquées.

L'objectif général de ce travail est d'examiner les impacts du changement climatique sur les ressources en eau de surface du Bafing (HBS) dans les décennies à venir. Plus spécifiquement l'étude vise à :

- ✓ Caler et valider le modèle hydrologique GR4J sur le bassin versant du Bafing avec les données hydrométéorologiques observées ;

- ✓ Examiner les changements potentiels des variables hydroclimatiques (précipitation, température et évapotranspiration) sous les scénarios SSP245 et SSP585 ;
- ✓ Analyser l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du Bafing en forçant le modèle GR4J avec les données corrigées.

Cette étude est composée de trois Chapitres :

- Dans le chapitre I, nous présentons quelques généralités sur le fonctionnement du bassin versant, sur les Changements climatiques et sur la modélisation hydrologique ;
- Le chapitre II est consacré à la présentation de la zone d'étude, des données et méthodologies utilisées dans ce travail ;
- Le troisième et dernier partie chapitre est réservée aux résultats et discussions sur l'évaluation du modèle hydrologique, la performance des modèles climatiques à simuler le climat présent ainsi que les résultats sur l'analyse des impacts futurs du changement climatique sur le régime hydrologique. Cela est suivi, d'une conclusion, des perspectives, et des recommandations.

CHAPITRE I : Généralités

Introduction

Un bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets. Les changements climatiques constituent aujourd'hui un phénomène global avec de graves répercussions pour de nombreux pays. Les simulations climatiques, après une descente d'échelle, vont alimenter un modèle hydrologique. Il existe plusieurs types de modèles qui sont souvent conçus de façon très différente. Dans les pages suivantes nous allons présenter une généralité sur le bassin versant, le changement climatique et sur la modélisation hydrologique.

I.1. Généralités sur le fonctionnement d'un bassin versant

Le fonctionnement d'un bassin versant repose généralement sur ses caractéristiques physiques (pente, superficie, exutoire, etc.) et son hydrologie.

Ce fonctionnement commence par le cycle hydrologique dont le moteur principal est l'énergie solaire. Le cycle de l'eau ou cycle hydrologique est l'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau. À l'échelle du bassin versant, le cycle de l'eau est aussi un ensemble de processus complexes et variés : les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement de surface, l'infiltration, la percolation, l'emménagement et les écoulements souterrains.

Par définition, le bassin versant (Figure1) représente une entité géographique drainée par un réseau hydrographique, sur laquelle toutes précipitations reçues ruissellent vers le point le plus bas que l'on appelle l'exutoire. Autrement dit le bassin versant est l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et ses effets. Il est délimité par les crêtes (ligne de points hauts d'un relief séparant deux versants opposés) au-delà desquelles les pentes dirigent les précipitations tombées vers un autre cours d'eau. Ces frontières sont appelées lignes de partage des eaux. La connaissance des paramètres hydrologiques d'un bassin versant permet d'avoir une idée sur son comportement.

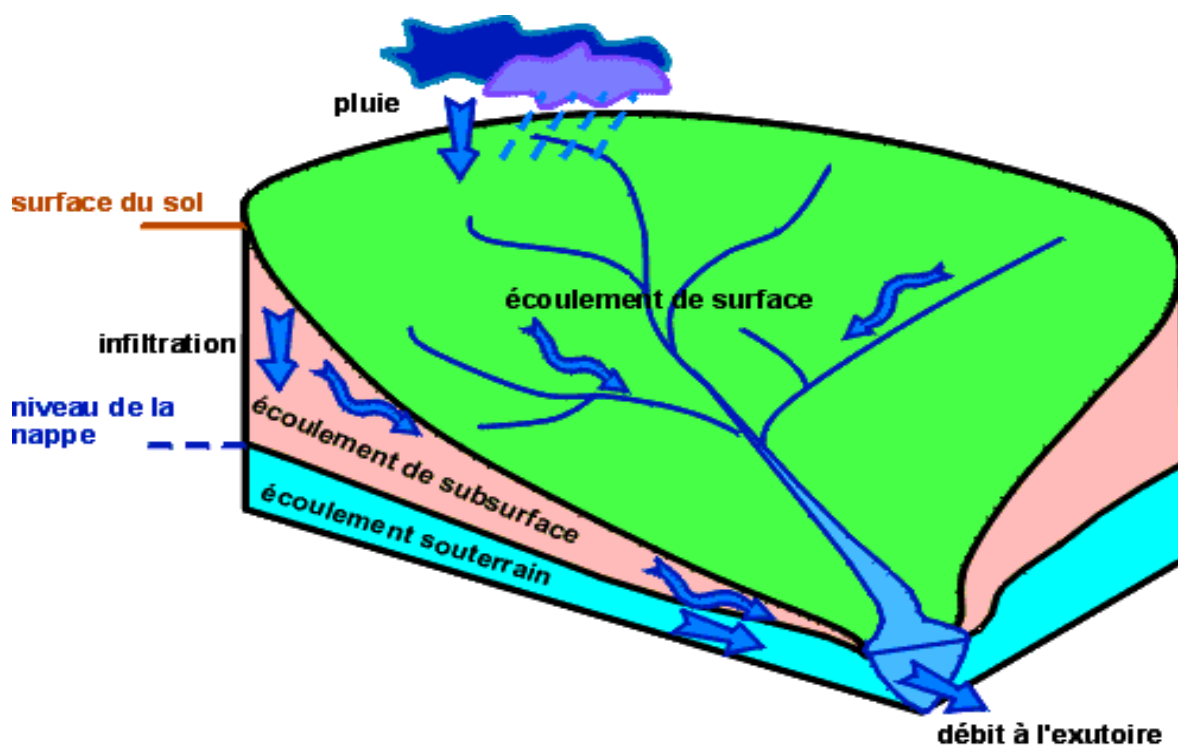


Figure 1: Structure d'un Bassin versant (<http://www.cig.ensmp.fr>)

I.2. Généralités sur les changements climatiques

I.2.1. Définitions

Le climat est un phénomène global et complexe qui a un impact sur l'ensemble des formes de vie de la planète. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est « la synthèse des conditions météorologiques d'une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère ». Le Groupe D'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) entend par changement climatique toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cette définition semble être différente de celle de la CCNUCC qui définit par changement climatique toute modification du climat causée directement ou indirectement par les activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère, et s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables.

I.2.2. Causes des changements climatiques

En effet, la plupart des membres de la communauté scientifique s'accordent à dire que la majeure partie du réchauffement observé au cours de la seconde moitié du XXe siècle serait imputable aux activités humaines (GIEC, 1990). Nos habitudes de consommation, d'exploitation, de production, de transformation seraient donc parmi les responsables de ces changements. On sait que l'atmosphère de la Terre laisse passer la lumière du soleil qui

réchauffe la surface du globe. La chaleur qui s'élève de la surface de la terre est en partie absorbée par les gaz et la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, ce processus qui conduit à élever la température est appelé « effet de serre ». En l'absence de gaz à effet de serre [dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O), etc.], la plus grande partie de la chaleur pénétrant dans l'atmosphère terrestre serait directement réémise dans l'espace, et la température moyenne de la Terre serait de -18 °C au lieu de 15° C.

Selon Bouraima (2010), la concentration de ces gaz a commencé à croître avec l'avènement de l'industrialisation, la hausse de la demande en énergie, la croissance démographique et les changements dans l'utilisation des terres.

Les différents méfaits environnementaux (pollution par les déchets domestiques, les fertilisants toxiques, déchets industriels et biomédicaux, pollution atmosphérique, etc.) causés par l'action de l'homme, contribuent directement ou indirectement au phénomène global du réchauffement de la planète comme l'a souligné l'académie des sciences (Puget et al., 2010).

En outre, les causes de ce changement climatique peuvent très bien être naturelles : des facteurs naturels externes au système climatique, comme des changements de l'activité volcanique, de l'émission d'énergie solaire et de l'orbite de la Terre autour du Soleil, peuvent altérer le climat de la planète. Parmi ceux-ci, les deux facteurs qui sont déterminants à des échelles temporelles pour les changements climatiques contemporains sont les changements à l'activité volcanique et les changements de l'intensité du rayonnement solaire. En ce qui a trait à l'équilibre énergétique de la Terre, ces facteurs agissent principalement sur la quantité d'énergie reçue. Les éruptions volcaniques sont épisodiques et exercent des effets sur le climat pendant une durée relativement courte. Ces éruptions sont capables d'injecter dans la basse stratosphère d'énormes quantités de poussières, de cendres, de pierres et de vapeur d'eau qui peuvent séjourner pendant plusieurs années (IPGP, 2007).

I.2.3. Situation et impact des changements climatiques sur les ressources en eau

Il est crucial d'avoir un accès fiable à l'eau propre pour l'usage domestique, la production alimentaire et énergétique, les loisirs et le maintien des écosystèmes naturels. Bien que la plupart des régions du monde ait éprouvé à un moment ou à un autre des difficultés telles que des sécheresses, des inondations ou des problèmes de qualité de l'eau en raison de la répartition inégale de cette ressource et de la variation de leur disponibilité d'une année à l'autre. Ces problèmes deviennent plus fréquents en raison du changement climatique. Ce dernier constitue aujourd'hui un phénomène global avec de graves répercussions pour de nombreux pays.

L'Afrique de l'Ouest est parmi les zones les plus vulnérables face aux impacts du changement climatique. Toutefois, et en dépit des efforts faits par la recherche, les connaissances scientifiques sur les changements climatiques et leurs impacts ont encore besoin d'être améliorées (PAS-PNA, 2018). En Afrique de l'Ouest, nous assistons à un déficit pluviométrique avec une diminution des volumes de pluies dans la période 1950-1989 et celle des ressources en eau (Vischel et al., 2015). L'agriculture pluviale largement pratiquée dans la région est exposée au risque de pénurie d'eau qui peut entraver plus ou moins durement la production agricole. Cette situation est parfois dramatique depuis les années 70 (avec principales années de sécheresse : 1972, 1973, 1983, 1984) (Dezetter, 1996). La situation générale ci-dessus décrite, se traduit au niveau du bassin du fleuve Sénégal par une réduction des écoulements et par conséquent un déficit des ressources en eau. Ainsi depuis quelques décennies, les débits écoulés du fleuve n'ont cessé de baisser. Dans ce contexte marqué par une tendance générale déficitaire, la gestion durable des ressources en eau du bassin représente une préoccupation de taille pour les quatre pays qui se partagent le bassin. Il a ainsi été observé que le réchauffement de la température des lacs et des rivières entraîne une dégradation de la qualité de l'eau aussi bien en termes biologiques que chimiques. L'alimentation des nappes souterraines devrait diminuer avec la réduction des précipitations et du ruissellement, entraînant une augmentation du stress hydrique, notamment dans les régions où ces nappes souterraines viennent pallier les demandes en eau à usage agricole et domestique pendant la saison sèche (Barrat, 2012).

Le réchauffement des températures et les impacts qui y sont associés auront également des conséquences sur la qualité de l'eau disponible pour la consommation humaine en Afrique, en Asie et dans les petites îles notamment (GIEC, 2022).

Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau au Sénégal montrent des tendances inverses des débits de quelques bassins (PAS-PNA, 2018) : c'est-à-dire, une tendance à la hausse pour certains et une tendance à la baisse pour d'autres.

Au Sénégal, la question des changements climatiques pose notamment celle de la disponibilité de l'information climatique, sur laquelle les acteurs politiques pourraient s'appuyer pour développer des mesures d'adaptation pertinentes et réduire la vulnérabilité des populations (Noblet et al., 2018).

Pour remplir sa mission, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) a besoin de données et d'informations lui permettant de suivre et de prévoir l'évolution de la ressource en eau, compte tenu aussi de l'importance de la variabilité climatique de la région marquée par la récurrence de la sécheresse, des impacts potentiels du changement climatique et des impacts croissants de la pression démographique sur les ressources en eau.

Ainsi, un effort de recherche important a été consenti pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique du haut bassin par plusieurs auteurs tels que : Bamba et Baldé (2005), Coly et al. (2005), Kane et Diallo (2005), Nonguierma et Niang (2006), Bodian (2011), Mbaye et al. (2015), Mbaye et al. (2020), etc. Cependant, il n'est pas toujours possible de disposer de longues séries chronologiques de débits continus sur un même site dans la partie du haut bassin, permettant une évaluation complète des ressources en eau.

Dans ce contexte, la diminution des précipitations et des débits va induire également des impacts indirects sur la ressource en eau avec par exemple :

- Une augmentation des volumes prélevés pour la consommation domestique, particulièrement pendant les périodes de sécheresse qui pourraient être de plus en plus fréquentes dans le futur ;
- Une augmentation des prélèvements pour l'irrigation, car plus il fait chaud, plus les plantes ont besoin d'eau ;
- Une augmentation des prélèvements d'eau souterraine induite par la diminution des ressources disponibles en surface.

I.3. Généralité sur la modélisation hydrologique : Modélisation pluie débit

L'aménagement de ponts et de barrages sur des fleuves ou l'exploitation des cours d'eau pour l'irrigation supposent une bonne connaissance de leurs étiages et de leurs crues. Ainsi, l'analyse et la caractérisation précise de la variabilité des ressources en eau constituent un domaine de recherche indispensable, en ce sens qu'il doit déboucher sur l'élaboration de scénarios permettant la prévision et la gestion de ces ressources. Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels (à l'image des bassins versants), ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité de différents processus hydrologiques. La transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin, fait partie des processus les plus complexes à modéliser. Ainsi deux types de modèles sont couramment utilisés pour conceptualiser cette relation pluie-débit : les modèles conceptuels et les modèles "boîte noire".

- ❖ Les modèles conceptuels (modèles à réservoirs et empiriques) ont longtemps été une référence opérationnelle pour les hydrologues pour transformer la pluie en débit, par le fait que ces modèles incorporent des hypothèses sur les mécanismes qui gouvernent le cycle hydrologique. Depuis le modèle de Stanford (Linsley et Crawford, 1966, Roche, 1971) à six réservoirs, plusieurs modèles sont apparus (par exemple, modèles CREC, Sim, Knapp, TOPMODEL, Amade, etc.) avec l'introduction des hydrogrammes unitaires (modèle GR), simulant le transfert de la pluie nette en débit de ruissellement.

- ❖ Les modèles “boîte noire” tentent de représenter la relation pluie–débit par une formulation mathématique, de type autorégressif (modèle ARMAX Autorégressive Moving Average with eXogenous input). Ces modèles n’ont pas atteint les objectifs des hydrologues sur les bassins versants de petite taille à cause de la linéarité de la relation pluie–débit qu’ils présupposent. Par ailleurs, la simulation du débit à l’exutoire d’un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d’ingénierie et de gestion de la ressource en eau (Perrin et al, 2007). Parmi les objectifs de la modélisation hydrologique, on peut citer :
 - ✓ La simulation des débits, pour des sites non jaugés ou le comblement de lacunes dans des séries de données ;
 - ✓ La prévision des crues et des étiages, il s’agit d’estimer à l’avance des débits susceptibles de présenter des risques d’inondation ou de sécheresse ;
 - ✓ La prédétermination des débits de crues ou d’étiages : cela permet le dimensionnement d’ouvrages ou d’aménagements dans le lit du cours d’eau ;
 - ✓ La délimitation des zones inondables.

Pour prendre en charge ces objectifs, de nombreux modèles pluie-débit ont été développés. Ainsi un modèle pluie-débit est un outil mathématique qui intègre les processus hydrologiques à l’échelle du bassin versant pour déterminer la réponse de celui-ci face à un forçage. En guise d’exemples de modèles conceptuels, depuis une trentaine d’années, l’équipe d’hydrologie des bassins versants d’IRSTEA a développé une famille de modèles hydrologiques connus sous le nom de « modèle GR » (pour « Génie Rural »), permettant de prédire au mieux les débits des cours d’eau, et sur une très grande variété de bassins versants, tout en requérant que très peu de données d’entrées, données qui, par ailleurs, sont parfois aisément disponibles dans certains bassins (Haddi, 2016). Les modèles GR ont été développés à différents pas de temps : Annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J, GR5J, GR6J) et horaire (GR3H). Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journaliers) a été choisi dans cette présente étude due au fait de sa robustesse, sa simplicité et son utilisation aux grands nombre de bassins dans le contexte africain (Mbaye et al., 2020).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le fonctionnement du bassin versant, sur les changements climatiques (causes, situation en Afrique de l’Ouest et ses impacts sur les ressources en eau) et enfin sur la modélisation pluie-débit.

Chapitre 2 : Données et Méthodologie

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre zone d'étude, les données utilisées et les méthodes appliquées. Cette présentation du bassin versant de Bafing se focalise sur les aspects du milieu physique avec une description détaillée des caractéristiques climatiques, géologiques, morphologiques, et hydrologiques.

II.1. Présentation de la Zone d'étude

II.1.1. Localisation du Bassin Versant du Bafing

Le bassin versant du Bafing se situe entre la latitude 10°23' et 13° 48' Nord, et la longitude 10° 49' 12°08' Ouest, couvre une superficie de 21290 Km² à la station de Bafing Makana et 15660 Km² à Daka Saidou et est considéré comme la partie supérieure du fleuve Sénégal (figure 2). Avant sa confluence avec le Bakoye, qui le rejoint en rive droite à Bafoulabé, dans la région de Kayes (Mali), le Bafing contrôle les eaux qui arrivent dans le barrage de Manantali. Le Bafing prend naissance en Guinée sur les hauteurs du Fouta Djalou, entre Mamou et Dalaba, à une altitude de 1 537 mètres et parcourt plus ou moins 500 kilomètres avant de devenir le fleuve Sénégal. Le débit moyen annuel est de 332 m³/s et la pluviométrie moyenne annuelle est de 1490 mm (Bodian, 2011).

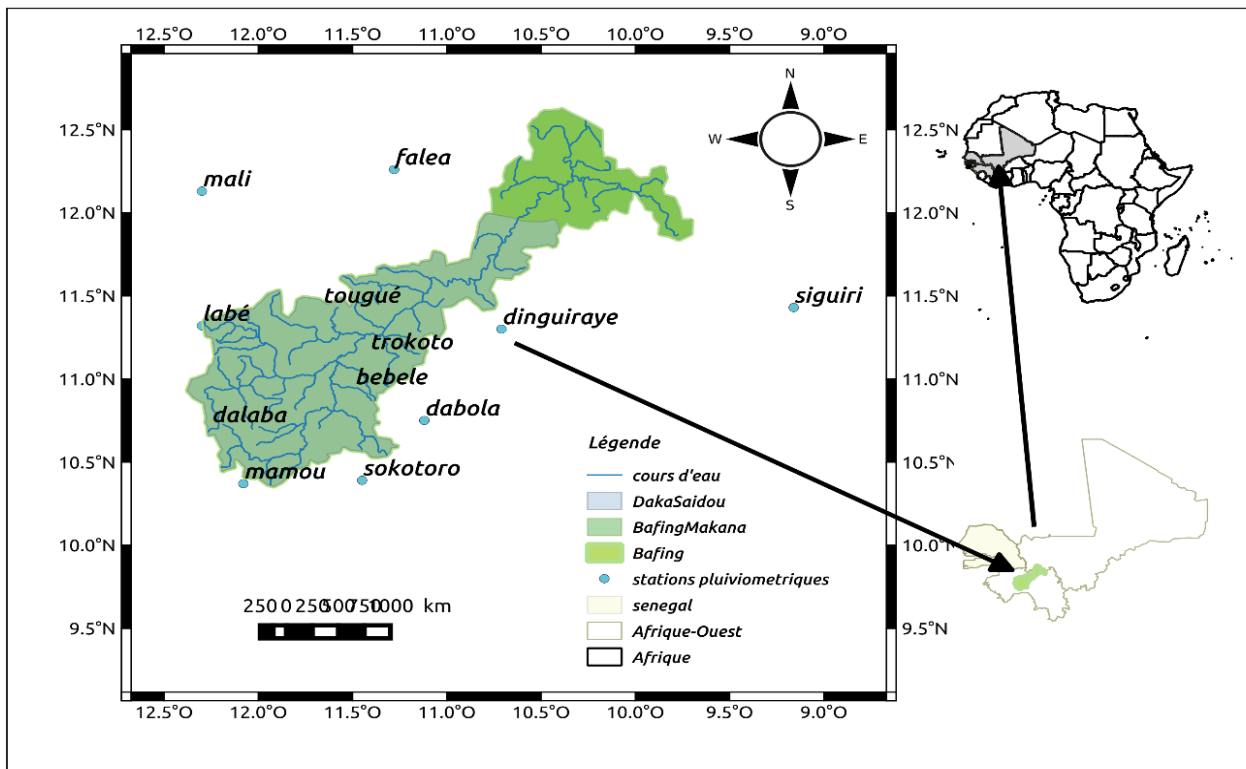


Figure 2 : Localisation du bassin versant de Bafing

II.1.2. Caractéristiques du Bassin versant de Bafing

II.1.2.1. Caractéristiques de forme

La forme du bassin versant à une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée. Pour ce bassin versant, nous avons travaillé dans les sous bassins de Bafing Makana (sous bassin 1) et de Daka Saidou (sous bassin 2).

Surface et Périmètre

La surface (A) est la portion du plan délimité par la ligne de crête, ou contour du bassin, elle est généralement exprimée en Km^2 , sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre,

$A_1=21290 Km^2$ (Bafing Makana), $A_2=15660 Km^2$ (Daka Saidou).

Le périmètre (P) est la longueur de la ligne de contour du bassin. Il est mesuré à l'aide d'un curvimètre et s'exprime en Km,

$P_1 = 1092$ (Bafing Makana), $P_2 = 868$ (Daka Saidou)

Indice de compacité de Gravelius (1914)

Il existe plusieurs indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Nous allons citer l'indice de compacité de Gravelius K_G appelé aussi le coefficient de compacité, il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface : $K_G = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}} = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$.

Un bassin versant est de forme circulaire lorsque $1 < K_G < 1.15$, de forme intermédiaire si $1.15 \leq K_G \leq 1.5$ et de forme allongée lorsque $K_G \geq 1.5$.

On obtient :

- Dans la station de Bafing Makana $K_G = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 * \frac{1092}{\sqrt{21290}} = 2.09$
- Dans la station de Daka Saidou $K_G = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 * \frac{868}{\sqrt{15660}} = 1.94$

Les valeurs de l'indice de compacité montrent que le bassin versant de Bafing d'une façon générale à une forme allongée dans la station de Bafing Makana et de Daka Saidou.

II.1.2.2. Géomorphologie

Les plateaux et les glacis constituent les traits géomorphologiques dominants du haut bassin versant du fleuve Sénégal (Gac et al., 1990). Maignien (1958) et Michel (1973) ont identifié trois grandes surfaces d'aplanissement cuirassées et disposées en gradins successifs, un relief intermédiaire de moyenne altitude cuirassée sur les versants, et trois glacis d'extension très variables.

❖ Les Surfaces d'aplanissement :

- Surface de Labé, il n'en subsiste plus que quelques lambeaux, perchés entre 1150 et 1200 m sur les hauts reliefs du Fouta Djallon (Bodian., 2011).
- Surface de Dongol Sigon, elle couvre une vaste superficie dans la partie orientale du Fouta Djallon. Elle s'étend très largement de part et d'autre du cours supérieur du Bafing où les vastes bowé déroulent leur terrain rocailleux entre 850 et 1000 m d'altitude (Gac et al., 1990).
- Surface de Fantofa Située en contrebas de celle de Dongol Sigon, elle se dispose entre 550 et 650 m, le long des vallées alluviales (Bamba, 1987 , Gac et al., 1990).

❖ Les Glacis

Durant le quaternaire ancien, l'histoire géomorphologique de la région est dominée par la mise en place de glacis (surface de terrain inclinée que l'on rencontre essentiellement dans les régions de piémonts et en bas des buttes) résultant de l'érosion fluviale. En effet, l'érosion a mis en place d'importantes nappes détritiques constituées de matériaux fins, de galets et de graviers de cuirasses. Le haut bassin s'est alors formé par accumulation et migration des sesquioxides (Bamba, 1987).

II.1.2.3. Hydrogéologie

Les connaissances hydrogéologiques du haut bassin sont fragmentaires (Coly, 1996). Les études reprennent en général la classification proposée par l'ORSTOM qui classe les terrains selon une échelle de perméabilité en fonction de la structure, de l'état de fissuration et de la lithologie. Orange (1992) définit six classes lithologiques qui correspondent à des comportements hydrogéologiques. L'analyse combinée de leurs caractéristiques et de la répartition de chacune des formations confirme l'imperméabilité du haut bassin (Rochette, 1974). Toutefois, Orange (1992) souligne avec intérêt que les progrès accomplis tant dans le domaine de l'hydrogéologie que dans celui des disciplines connexes (hydrologie de surface, géomorphologie, pédologie et géochimie) autorisent à nuancer les propos de Rochette (1974). En effet, dans certaines conditions, ces formations composées de roches éruptives et métamorphiques peuvent contenir des ressources exploitables. Coly (1996) abonde dans le même sens en affirmant que 47 % des terrains sont susceptibles de renfermer des nappes ; ainsi la présence d'aquifères est en rapport avec les linéaments (fissures, diaclases...) et le niveau d'altération liés aux processus physico-chimiques.

II.1.2.4. Pédologie

Le Bafing est en pleine zone foutanienne domaine des sols ferrallitiques montagnards. Mais, en fait, comme l'ont souligné différents auteurs (Maignien - 1953, Bonfils - 1954, Vas Es et Pereira Barreto, 1961/1962), toute la pédogenèse des sols du Haut Bassin est dominée par le colluvionnement, conséquence directe de l'érosion hydrique (Maignien). Le ruissellement joue

un tel rôle dans cette région que l'on pourrait considérer tous les sols comme des sols de montagne très érodés, complexés par le colluvionnement (Bonfils). A ce facteur dominant, il faut cependant et surtout ajouter les processus de cuirassement anciens, récents ou actuels, liés aux mouvements du fer. Utilisant la classification française des sols, les principaux types de sols rencontrés sont :

- **Les sols minéraux bruts** : ces sols sont essentiellement constitués par un matériau rocheux (sens large) ne manifestant pratiquement aucune évolution pédologique apparente. Ils sont alors représentés par des affleurements de roches plus ou moins saines et dures (Lithosols) ou par des accumulations de matériaux meubles (Régosols). Dans la région qui nous intéresse il s'agit presque exclusivement de Lithosols, pour la plupart mis en place par des processus d'érosion qui ont décapé les couches superficielles (sols ou manteau d'altération) qui les recouvraient. Ces sols sont représentés d'une part, par les cuirasses et débris de cuirasses et d'autre part, par les formations rocheuses en affleurement.
 - **Les sols jeunes ou peu évolués** : ces sols sont pour la plupart, étroitement liés aux sols minéraux bruts cuirasses ou formations rocheuses. On peut distinguer principalement, les sols peu évolués rosoliques sur matériau squelettique ferrugineux ou rocheux (de profondeur très variable, leur comportement hydrique est sous la dépendance non seulement des éléments rocheux ou Ferrugineux (quantité, dimension, nature) mais également de la nature (surtout texturale) et de l'abondance de la gangue matricielle) et les sols sur remblais colluviaux généralement sur cuirasse (Ils sont constitués d'un matériau limono-sableux plus ou moins argileux. On les rencontre assez fréquemment mais par taches sur certains plateaux cuirassés. Ils sont fréquemment marqués par l'hydromorphie.)
 - **Les sols ferrallitiques**, en fonction de la nature de la roche-mère ou du matériau originel, on peut distinguer : les sols rouges ferrallitiques sur roches plus ou moins basiques, les sols beiges ou jaunes ferrallitiques dont la genèse semble liée aux formations plus acides (grès, granites...) et les sols ferrallitiques lessivés sur matériaux sableux à sablo-argileux dérivés des grès.
 - **Les sols hydromorphes** : des sols dont l'évolution est dominée par l'action d'un excès d'eau. Ce sont tous les sols dans lesquels, par suite d'un drainage interne insuffisant dû généralement à leur position topographique (bas-fond, zone plane ou déprimée mal drainée) et/ou à des conditions pétrographiques (matériau imperméable du sol même ou du matériau sous-jacent), il y a un excès d'humidité dans une partie ou l'ensemble du profil.
- En résumé, pour l'ensemble du bassin versant du Bafing, on peut retenir, selon Rochette (1974), la dominance absolue de sols très squelettiques (surtout cuirassés) en modelé très tourmenté.

Sur le plan aérologique, il y a la confrontation de deux masses d'air : l'un chaud et sec, l'harmattan, provenant du Sahara qui dirige un flux de Nord-Est en saison sèche et l'autre, le flux de mousson, chaud et humide, venant du golfe de Guinée au Sud-Ouest.

II.1.3. Localisation des stations utilisées

Le cadre d'étude est le haut bassin du fleuve Sénégal composé des stations hydrométriques et pluviométrique (Tableau 1). Cet espace s'étend sur la Guinée Conakry et le Mali avec une superficie de 21 290 Km² à la station hydrométrique de Bafing Makana et 15660 Km² à Daka Saidou. Dans cette zone le suivi et la collecte des données pluviométriques causent d'énormes difficultés, ce qui nécessite alors un choix des stations de référence, les critères de choix reposant sur trois facteurs :

- L'importance de la taille de l'échantillon ;
 - Leur proximité avec la zone d'étude (c'est-à-dire leur position géographique) ;
 - La qualité des données (faiblesse des lacunes dans les différentes séries réellement observées).
- Sur la base de ces critères, sept stations pluviométriques et deux pluviométriques ont été retenues comme station de référence dans cette étude (tableau 1). Parmi ces stations pluviométriques quatre (Mamou, Dalaba, Labé et Tougué) se trouvent à l'intérieur du bassin (figure 4).

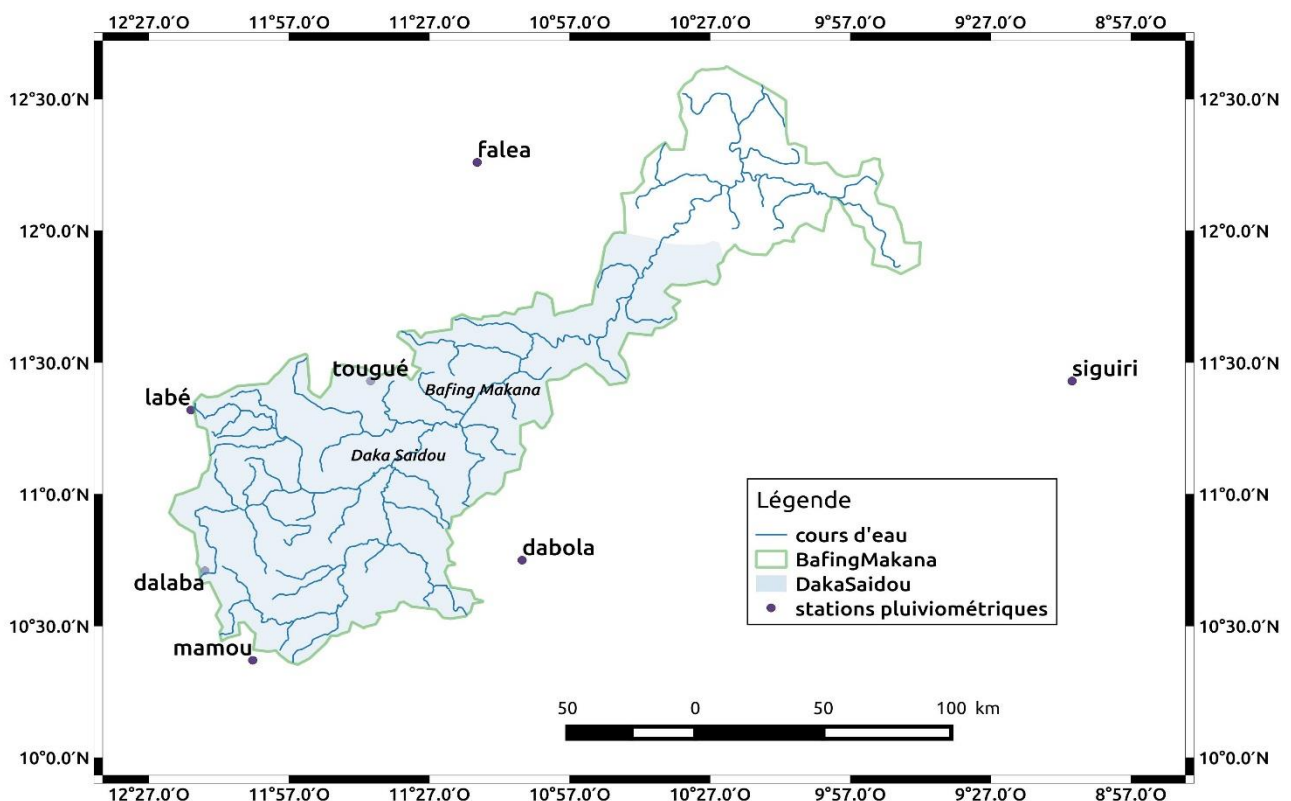


Figure 4 : Localisation des stations utilisée

II.2. Présentation des Données hydro climatique

II.2.1. Données d'observation

❖ Données de Stations

Les données météorologiques font partir des variables d'entrée qui permettent de réaliser une modélisation hydrologique. Une estimation précise et cohérente de ces variables est indispensable à l'obtention de résultats de simulation hydrologique adéquats (Roy, 2011).

Les données climatiques journalières observées pour faire tourner le modèle hydrologique (pluie-débit) sélectionnées pour cette étude sont des données de débits, précipitations et de températures (Maximale, minimale et moyenne) pour les stations énumérées ci-dessous (tableau 1). Ces données proviennent de l'OMVS et de la direction de la météorologie nationale (DMN) de la Guinée et du Mali.

Tableau 1 : Liste des stations et données d'observations utilisées

Station	Type de station		Altitude(m)	Variables	Années d'observation
BAFING MAKANA	Hydrométrique		239	Débit m³/s	1981-2019
DAKA SAIDOU	Hydrométrique		307	Débit m³/s	1981-2019
DABOLA	Pluviométrique		438	Precipitation, température	1981-2010
DALABA	Pluviométrique		1202	Precipitation, température	1981-2010
SIGUIRI	Pluviométrique		362	Precipitation, température	1981-2010
LABE	Pluviométrique		1025	Precipitation, température	1981-2010
MAMOU	Pluviométrique		782	Precipitation, température	1981-2010
TOUGUE	Pluviométrique		086	Precipitation, température	1981-2010
FALEA	Pluviométrique		455	Precipitation, température	1981-2010

❖ Données Satellitaires

Dans le haut bassin du Fleuve Sénégal surtout dans la zone guinéenne, les données sont souvent lacunaires et discontinues, on a utilisé des données satellitaires pour combler ses lacunes.

Ce sont des données de précipitations du Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) issu de l'institut international de recherche sur le climat et la société (IRI), des données de températures et de précipitations de Earth Observe WFDEI and ERA interim data merged and Bias corrected for ISIMIP (EWEMBI), issu de la combinaison des données observation in situ et satellitaire (ERA-Interim ; Dee et al., 2011). Ces données ont une résolution temporelle journalière et une résolution spatiale de 0.25°x 0.25° pour CHIRPS et 0.5°x 0.5° pour EWEMBI. Elles couvrent les périodes de 1981-2010 pour EWEMBI et 1981-2014 pour CHIRPS.

Tableau 2 : Données satellitaires utilisées.

Donnée	Variables	Institution	Références et sources
CHIRPS	Précipitation	Groupe Risque climatiques, Université de Californie à Santa Barbara	Funk, et al 2015 https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/
EWEMBI	Précipitation, Température (max, min)	Institut Postdam pour la recherche sur l'impact climatique	Calton et al. (2016) https://data.isimip.org/datasets/7e97dc65-2189-470e-9844-3223e5dd5cf8/

II.2.2. Données de sortie de modèles climatique

Les données de sorties de modèles climatiques de CMIP6 ont été utilisées. Ces modèles ont des résolutions spatiales différentes et de même résolution temporelle (journalière). Elles couvrent la période de 1980 à 2014 pour l'historique et de 2015 à 2100 pour les projections. Dans cette étude nous avons utilisé trois variables (précipitation, température maximale et minimale) de six modèles du CMIP6 (Tableau3).

Tableau 3 : Données de sortie de modèles climatiques

Modèle Climatique Général	Institution	Périodes		Résolution Spatiale
		Historique	Scénarios	
CanESM5	Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCCma)	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	2.81° x 2.79°
CNRM_CM6-LR	Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France et laboratoire CNRS	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	1.40° x 1.40°
IPSL_CM6A_L	Institut Pierre-Simon Laplace	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	2.5° x 1.26°
FGAOLS	Académie chinoise des sciences, Pékin	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	2.0° x 2.02°
NESM3	Université des sciences et technologies, Nanjing (Chine)	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	1.87° x 1.86°
IMN_CM4-8	Institut de mathématique numérique : académie russe des sciences, Moscou	1981-2014	SSP245-SSP585 2015-2100	2° x 1.5°

II.3. Méthodologie

Tout travail de recherche scientifique utilise des méthodes, des techniques et des outils appropriés pour obtenir les résultats escomptés. La méthodologie est l'approche à suivre pour atteindre les objectifs de notre travail.

II.3.1. Méthode de calcul

II.3.1.1. Calcul de la pluie moyenne du bassin

Il existe de nombreuses méthodes de calcul de la pluie moyenne dans la littérature scientifique. Cependant, du fait du nombre très limité de stations, la pluie moyenne reçue par le bassin est calculée à partir des données pluviométriques des 7 stations pluviométriques en utilisant la méthode arithmétique. La série de la pluie moyenne calculée couvre la période 1981-2010.

II.3.1.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP), un des termes majeurs du bilan hydrologique, est en relation directe avec le climat, le sol ou encore la végétation (Faye et Sow, 2014). L'ETP a été calculée par la formule de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) et modifiée par Allen et al. (1998) à l'aide d'une feuille de calcul Excel en utilisant les températures journalières maximales (T_{max}), minimales (T_{min}), moyenne (T_{mean}) et la latitude du milieu. La formule de la FAO 1998 est la suivante :

$$ETP = 0.0023 (T_{mean} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra \quad (1)$$

Avec, Ra = équivalent en eau du rayonnement extraterrestre en (mm/jour)

II.3.1.3 Coefficient de ruissellement

Le ruissellement se produit quand l'intensité des pluies dépasse les capacités d'infiltration et de stockage superficiel des sols. Le coefficient de ruissellement est défini comme le rapport de la hauteur d'eau ruisselé à la hauteur d'eau précipitée au cours d'un événement pluvieux. IL permet aussi de déterminer la nature de l'écoulement de surface de la zone. La formule est la suivante

$$: Cr = \frac{Rs}{Pr} \quad (2).$$

Rs : correspond à la lame d'eau écoulée en mm

Pr : correspond à la lame d'eau précipité en mm

Dans cette étude, nous avons calculé le coefficient de ruissèlement à partir des débits journaliers en millimètre (mm) considéré comme lame d'eau ruisselée (pluie nette) et la pluie moyenne du Bassin (mm) comme étant la pluie brute. On a utilisé les valeurs moyennes sur la période d'étude (1981-2010).

$$Pr = 1332.433 \text{ mm/an et } Rs = 354.616 \text{ mm/an}$$

$$Cr = \frac{Rs}{Pr} = \frac{354.616}{1332.433} = 0.266 \text{ soit } 26.6\%$$

II.3.1.4. Indice standardisé de précipitation et évapotranspiration (SPEI)

L'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) est une extension de l'indice de précipitation normalisé (SPI) largement utilisé. Le SPEI est conçu pour prendre en compte à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la détermination de la sécheresse. C'est un indice de sécheresse multiscalaire basé sur des données climatiques. Il peut être utilisé pour déterminer le début, la durée et l'ampleur des conditions de sécheresse par rapport aux conditions normales dans une variété de systèmes naturels tels que les cultures, les écosystèmes, les rivières, les ressources en eau, etc. Depuis sa proposition en 2010 (Vicente-Serrano et al., 2010a), il a été utilisé dans de nombreuses études (Nam W. H., 2015, Yang et al., 2016, Sané et al., 2020, etc.). Le SPEI peut être calculé à l'échelle mensuelle avec intervalle de temps égale $\Delta t = 1$, ou du cumul à plus d'un mois avec intervalle de temps supérieur $\Delta t > 1$. Les valeurs typiques sont de 1, 3, 6, 12, 24 et 48 mois. Si l'indice cumulé est calculé, la date de départ de la série SPEI résultante sera décalée d'un certain nombre de mois égal à l'intervalle de temps moyen Δt . Les différentes valeurs des SPEI et les classes de sécheresse ou d'humidité sont résumées dans le tableau 4

Tableau 4 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de SPEI (sané et al., 2020)

Valeur de SPEI	Classe de sécheresse	Valeur de SPEI	Séquences humides
$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$	Sécheresse légère	$0 < \text{SPEI} < 0.99$	Légèrement humide
$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$	Sécheresse modérée	$1 < \text{SPEI} < 1.49$	Modérément humide
$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$	Sécheresse sévère	$1.5 < \text{SPEI} < 1.99$	Sévèrement humide
$\text{SPEI} \leq -2$	Sécheresse extrême	$2 < \text{SPEI}$	Extrêmement humide

Dans notre étude nous l'avons calculé à l'échelle mensuelle au pas de temps de 3 et de 12 mois qui correspondent respectivement à la sécheresse Météorologique (SPEI3) et Hydrologique (SPEI12) à l'aide de la fonction SPEI sur R qui utilise par défaut, la fonction de distribution log logistique. Les résultats sont montrés dans la figure 5.

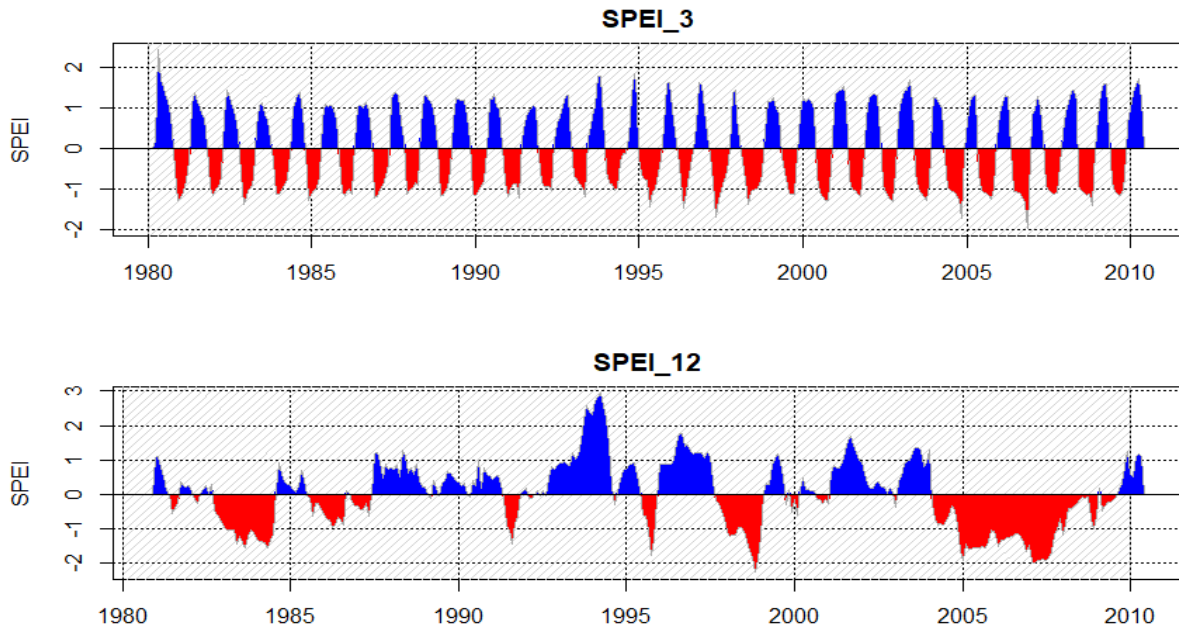


Figure 5 : Variation interannuelle des SPEI

La figure 5 montre la variabilité interannuelle de la valeur de SPEI3 et SPEI12 sur la période de 1981 à 2010.

L'analyse de cette figure montre, explicitement des séquences de sécheresse et d'humidité dans le bafing. Les séries SPEI avec les échelles de temps (3 et 12 mois) indiquent d'une manière générale une tendance au dessèchement de la zone et des séquences humides sur quelques années (surtout pour le SPEI3). Selon ses valeurs de SPEI, les conditions d'humidité étaient très contrastées avant et après 1995. En effet, ce dessèchement est toutefois beaucoup plus apparent au niveau de l'échelles de temps 12 mois qui montrent un caractère sec presque tous les mois sur chaque année, notamment sur la période 2004-2010 avec des valeurs de SPEI comprises entre -2 et -0.5 suggérant une sécheresse sévère et modérée, respectivement. On note aussi des périodes humides pour cette même échelle de temps avec des valeurs de SPEI comprises entre 0.5 et 2 qui suggèrent des séquences d'humidité légère et extrêmes dans cette zone surtout la période de 1992 à 1998.

Ensuite, pour le SPEI3 on note des séquences humides avec des valeurs de SPEI comprises entre 1 et 1.5 qui montre des conditions humides et modérées dans le Bafing. Nous avons également noté que des séquences de sécheresses modérées et sévères sont fréquentes surtout entre 2003 et 2010 avec des valeurs de SPEI comprises entre -1.5 et -1.

En somme, avant 2000, la plupart des valeurs SPEI annuelles sont positives, certaines années ayant une valeur supérieure à 1,0 ; seules les valeurs de quelques années sont inférieures à -1,5 ; cependant, juste après 2000, presque toutes les valeurs SPEI sont négatives ; près de la moitié d'entre elles sont inférieures à -1,0, à l'exception de quelques années avec une valeur SPEI supérieure à 0 (2002, 2003, 2004). Cependant, on peut estimer que les sécheresses ont véritablement commencé depuis 1970 et sont de nature légère à modérée, même si des cas de sécheresses sévères à extrêmes apparaissent sur certains mois sur les différentes échelles de temps. Ces résultats confirment les recherches effectuées par de nombreux chercheurs qui ont déjà signalé cette grave sécheresse en Afrique de l'Ouest (Servat et al., 1999 ; Sighomnou, 2004 ; Goula et al., 2005 ; Soro et al., 2014) et au Sénégal (Faye et al., 2015 ; Faye et al., 2017) en indiquant que les années 1970, 1980, et 1990 ont été des périodes sèches marquées par un fort déficit pluviométrique. Cette sécheresse pluviométrique entraîne une sécheresse hydrologique marquée par une baisse des crues.

II.3.1.5. Indice des débits extrêmes

La connaissance des débits de crue reste un axe de recherche important en hydrologie pour la conception des aménagements des cours d'eau, le dimensionnement des ouvrages de franchissement et la protection des zones urbaines. Dans cette partie, nous allons décrire les 5^e, 50^e et 95^e centile à savoir les bas, moyens et hauts débits.

- **Le 5^e centile : Q_{05} (bas débits)**

Le cinquième percentile du débit Q_{05} correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée par 5 % des débits. Q_{05} est donc un indicateur sur les faibles débits.

- **Le 50^e centile Q_{50} (les débits moyens)**

Le cinquantième percentile Q_{50} correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée par 50 % des débits. Il donne donc une indication sur les débits moyens.

- **Le 95^e centile Q_{95} (hauts débits)**

Le quatre-vingt quinzième percentile Q_{95} correspond à une valeur des débits qui n'est pas dépassée par 95 % des valeurs, il donne donc une indication sur les hauts débits.



II.3.1.6. Correction des Biais

Les sorties des modèles climatiques présentent des biais qui nécessitent d'être corrigés. D'après (Mbaye et al., 2015 b), la technique de correction appliquée aux sorties de modèles climatiques modifie l'amplitude du signal climatique. En d'autres termes, la correction des biais des sorties de modèle permet d'avoir des données plus adaptées aux études d'impact à l'échelle locale.

❖ Méthode CDF-t

La méthode CDF-t (Cumulative Distribution Function – Transform) est une méthode statistique développée par Michelangeli et al., (2009) pour générer les fonctions de répartition d'une variable climatique locale en climat futur à partir des fonctions de répartition de cette même variable observée ou pseudo-observée dans le climat de référence (données de stations ou données de la réanalyse) et estimée par les simulations climatiques pour la période historique et pour les périodes futures. Il s'agit d'une amélioration de la méthode quantile-quantile par la prise en compte des modifications de la fonction de distribution, côté simulations, entre le climat présent et le climat futur. Contrairement aux autres méthodes de descente d'échelle, celle-ci produit tout d'abord la distribution statistique de la variable locale, et les séries temporelles sont ensuite générées dans un deuxième temps, à l'aide d'une méthode de type quantile-quantile appliquée sur les distributions futures. Les grandes étapes de cette méthode sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Les étapes de la méthode CDF-t (source : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128>)

	Historique	Future
Modèle climatique (MC)	$F_{Gh}T$ 	$F_{Gf}T$ 
Station	$F_{Sh}T$	$F_{Sf}T$

F_{Gh} et F_{Sh} définit respectivement le CDF de la variable modélisée par le MCG ou MCR (modèle climatique général ou régional) et de la variable observée (à station) pour une période historique. La transformation T permettant de passer de F_{Gh} et F_{Sh} est défini comme :

$$(F_{Gh}(x)) = F_{Sh}(x) \quad (3)$$

L'équation (3) est supposée valide pour tout x et donc pour $x = F_{GP}^{-1}(u)$ (4), quel que soit $u \in [0,1]$. En remplaçant x dans l'équation (3), on obtient :

$$(u) = F_{Sf}(F_{Gh}^{-1}(u)) \quad (5).$$

Cette relation est supposée rester la même entre les CDF de la variable modélisée et de la variable observée pour une période future, respective F_{Gf} et F_{Sf}

$$T(F_{Gf}(x)) = F_{Sf}(x) \quad (6)$$

On cherche maintenant quelle sera la fonction de distribution (CDF) pour la variable locale dans le futur (F_{Sf}). En appliquant l'équation (3) et (4) à F_{Gf} on obtient l'équation (7) qui permet de définir une fonction cumulative de distribution (CDF) pour les données des stations futures :

$$F_{Sf}(x) = T(F_{Gf}(x)) \Leftrightarrow F_{Sf}(x) = F_{Sh}(F_{Gh}^{-1}(F_{Gf}(x))) \quad (7)$$

II.3.2. Présentation du modèle hydrologique GR4J

L'objectif principal dans cette étude est la modélisation des débits dans le haut bassin du fleuve Sénégal. Le principe de la modélisation pluie-débit est de transformer les entrées du modèle (pluie, ETP et capacité en eau du sol) en sorties (débits).

II.3.2.1. Structure et fonctionnement du modèle GR4J

❖ Structure

Le modèle GR4J est un modèle conceptuel global journalier à 4 paramètres (Perrin et al. 2000). Son développement a été initié à l'IRSTEA au début des années 1980 avec l'objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau. Le modèle GR4J considère le bassin versant comme une entité globale. GR4J est un modèle simple mais efficace. Il est constitué d'un réservoir de production, d'un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires et d'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique qui utilise un terme source/puits censé représenter les échanges avec les nappes profondes (figure 6).

P : la pluie journalière du jour

E : évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

HU : Hydrogramme unitaire

Les paramètres à caler (X1 à X4)

X1 : capacité du réservoir de production (mm),

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm),

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

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

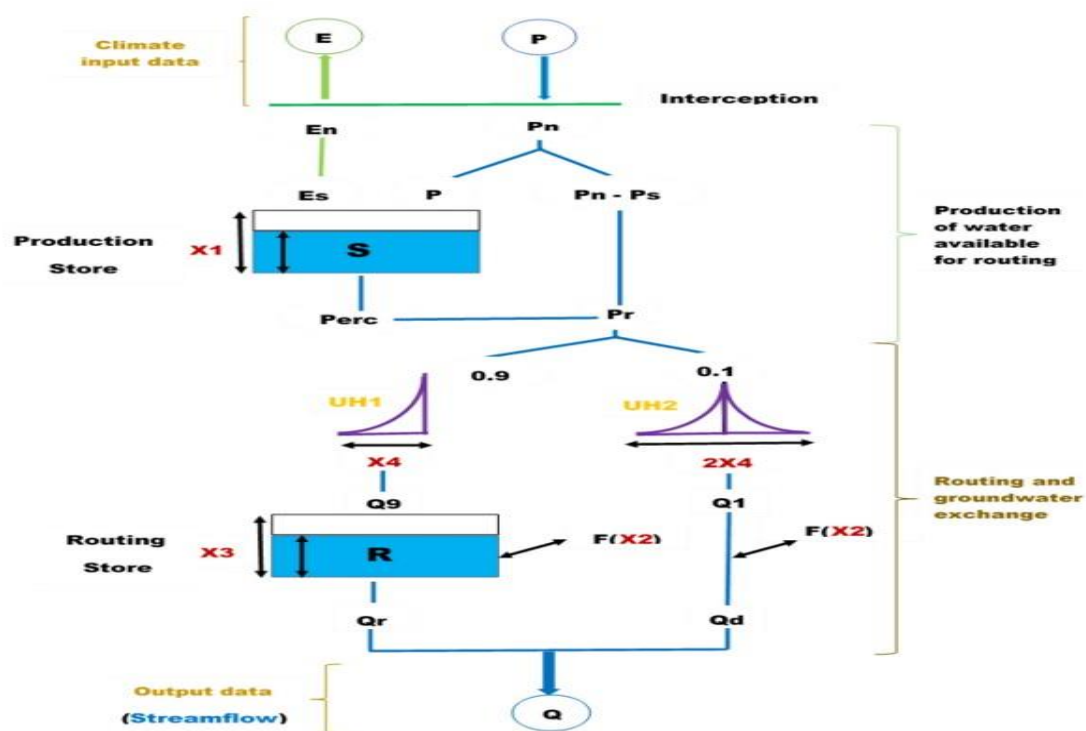


Figure 6 : Structure du modèle GR4J (Mbaye., et al,2020)

❖ Fonctionnement

Le modèle GR4J ne nécessite pas une description fine du bassin et n'a besoin qu'un nombre réduit de données d'entrées hydrométriques et d'informations sur le bassin versant, comme les séries de précipitation et d'évapotranspiration potentielle (ETP) exprimées en moyenne journalière sur le bassin, les débits moyens journaliers à l'exutoire pour le calage et la superficie du bassin.

L'apport pluviométrique P, après une phase d'interception, se répartit entre écoulement profond et remplissage du réservoir de production S, qui peut lui-même se vider par deux façons : par évapotranspiration ou bien par percolation vers l'écoulement profond. Ensuite, la lame d'eau produite est divisée en deux parties d'écoulement ; La première (90%) est transformée par un hydrogramme unitaire HU1 et remplit le réservoir de routage, la seconde est transformée par un hydrogramme unitaire HU2 et génère un écoulement rapide. Le terme F représente un terme d'échange avec les bassins voisins. Le réservoir de routage se vidange en générant un flux QR qui s'ajoute aux flux Qd pour donner l'écoulement final Q (Bouizrou,2015).

La fonction de production

La fonction de production évalue la partie des précipitations qui alimente les eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin versant, ainsi que la partie s'évapore.

P_k : La pluie journalière du jour k

E_k : évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour k.

P_n : Pluie nette

E_n : ETP nette

HU : Hydrogramme unitaire

Les différentes équations de fonctionnement du modèle GR4J sont données ci-dessous.

• Cas 1 : Si $P_k > E_k$, alors $P_n = P_k - E_k$ et $E_n = 0$ (8)

• Cas 2 : Si $P_k < E_k$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E_k - P_k$ (9)

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s (pluie spécifique) de P_n alimente le réservoir de production. Elle est calculée par :

$$P_s = \frac{\left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)\right) \cdot 2 \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (10) \quad S_k \text{ est le niveau de production du réservoir (mm)}$$

Dans le cas où E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production et est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (11)$$

Quel que soit le cas, le contenu du réservoir est initialement mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s \quad (12)$$

Ensuite une percolation (Per) issue du réservoir de production est calculée :

$$\text{Per} = S_k \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} + \frac{S_k}{X_1} \right)^4 \right]^{1/4} \right\} \quad (13)$$

De nouveau, s_k devient : $s_k = s_k - \text{per}$ (14)

La vidange peut se faire par deux chemins distincts l'évapotranspiration et la percolation. Et on obtient une quantité d'eau P_r entrante dans la partie routage du modèle. $P_r = \text{per} + (P_n - P_s)$ (15)

- **Hydrogramme unitaire**

P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90% étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10% par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du paramètre X_4 , les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à

partir des courbes en S (cumule de la proportion de la pluie unitaire traitée par hydrogramme en fonction du temps) notée respectivement SH1 et SH2.

SH1 et SH2 sont définies en fonction du temps par :

✓ **SH1**

Pour $t=0$ $SH1(t) = 0$ (16)

Pour $0 < t < X_4$ $SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2}$ (17)

Pour $t > X_4$ $SH1(t) = 1$ (18)

✓ **SH2**

Pour $t=0$ $SH2(t) = 0$ (19)

Pour $0 < t < X_4$ $SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^5$ (20)

Pour $X_4 < t < 2X_4$ $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^5$ (21)

Pour $t > 2X_4$ $SH2(t) = 1$ (22)

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (23)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (24) \quad \text{Où } j \text{ est un entier}$$

A chaque pas de temps i , les sorties Q_9 et Q_1 des deux hydrogrammes sont calculés par :

$$Q_9(i) = 0.9 \cdot \sum_{j=1}^i UH1(k) * (P_r(i - k + 1)) \quad (25)$$

$$Q_1(i) = 0.1 \sum_{j=1}^m UH2(k) * P_r(i - k + 1) \quad (26)$$

✓ **Le routage**

Le routage a un rôle de reconstitution de la réponse hydrologique du bassin versant à une impulsion de pluie ; il modélise conceptuellement l'écoulement jusqu'à l'exutoire. Pour le flux Q_d passant directement à l'exutoire, il est donné par :

$$Q_d = \max(0 ; Q_1 + F) \quad (27)$$

Où un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par F dont la formule est

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^2 \quad \text{où } R \text{ est le niveau dans le réservoir (28)}$$

Pour le flux $Q_r < R_k$ en sortie du réservoir,

$$Q_r = R_k * \left\{ \left[1 - \left(1 - \frac{R_k^4}{X_3} \right)^{-1/4} \right] \right\} \quad (29)$$

Nous obtenons après un nouveau niveau dans le réservoir : $R_k = R_k - Q_r$ (30)

Enfin, le débit en sortie de la simulation Q sera la somme des débits obtenus Q_d et Q_r

$$Q = Q_r + Q_d \quad (31)$$

II.3.2.2. Calage et validation du modèle

Caler un modèle consiste à rapprocher le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, c'est-à-dire, reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin (Serna, 2005). Pour caler le modèle GR4J, nous avons appliqué la procédure du split-

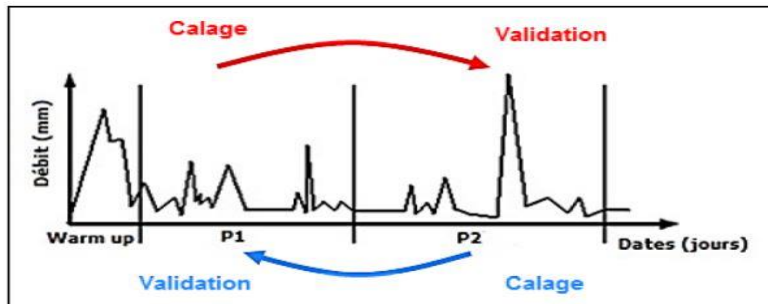


Figure 7 : Méthode de split sample test (Klemeš, 1986)

sample test (Klemeš, 1986) qui permet d'étudier la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps (Espinozo, 2017).

Procédure du split-sample test :

La procédure recommande plutôt de diviser la série chronologique des données en deux sous-périodes indépendantes de même taille (**P1** et **P2**). Ensuite, le modèle est **calé** sur la première période 1984-1994 (**P1**) et **validé** sur la seconde 1996-2006 (**P2**), puis **recalé** sur la seconde (**P2**) et **validé** sur la première (**P1**). Toutes les deux périodes de calage devront être précédées d'une année de mise en route du modèle (allant du 1^{er} janvier 1983 au 31 décembre 1983 pour le premier calage et du 1^{er} janvier 1995 au 31 décembre 1995 pour le second calage) pour initialiser le contenu des réservoirs (Chkir, 1994). Cette période d'initialisation n'est pas prise en compte dans le calcul des critères d'évaluation du modèle. La période 1996-2006 a été utilisée pour la validation de la première période de calage (1984-1994) et celle 1984-1994 a été utilisée pour valider la seconde période de calage (1996-2006). Le choix de la période 1984-

2006 s'explique par le fait qu'elle est la période sur laquelle le jeu de données ne présente pas de lacune, donc le modèle GR4J n'admet pas de lacune en période de calage et de validation. Il faut noter que le calage utilisé pour cette étude est un calage automatique qui a consisté à changer, par itération, les valeurs des paramètres (X1, X2, X3 et X4) du modèle avec un intervalle régulier jusqu'à l'obtention des valeurs optimales du critère d'évaluation.

II.3.2.3. Critère d'évaluation du modèle

Une simple analyse visuelle des résultats d'une simulation n'est pas une évaluation objective du modèle. Ainsi nous avons besoin d'utiliser des critères objectifs pour comparer les simulations aux observations. Plusieurs critères existent pour quantifier l'écart entre les observations et les simulations.

- **Efficacité Kling-Gupta KGE**

Gupta et al. (2009) ont proposé une décomposition du critère, Kling-Gupta Efficiency (KGE), qui permet de tenir compte de la variabilité, de la corrélation et de la moyenne des débits. Le KGE varie entre $-\infty$ et 1, plus il est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des débits de référence. Nous avons utilisé la fonction-objectif KGE sur la racine carrée des débits pour les débits moyens, sur le logarithme des débits pour les bas débits, et sur les débits pour les hauts débits. La fonction-objectif KGE se présente sous la forme suivante :

$$KGE(Q) = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (32) \quad \alpha = \sqrt{\sum i} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{(\sum i Q_{sim_i})}{(\sum i Q_{ref_i})} \quad (34) \quad \rho = \sum i \quad (35)$$

Q_{sim_i} et Q_{ref_i} sont respectivement le débit simulé et le débit de référence au jour i . $\overline{Q_{sim}}$ et $\overline{Q_{ref}}$ correspondent à la moyenne sur l'ensemble de la période considéré. ρ , α et β sont respectivement le rapport des écarts-types, le rapport de volume et le rapport de corrélation.

Tableau 6 : Performances du modèle avec KGE (Gupta et al., 2009)

Critère de Kling-Gupta KGE	Performance du modèle
$0,75 < KGE \leq 1$	Très Bonne
$0,65 < KGE \leq 0,75$	Bonne
$0,50 < KGE \leq 0,65$	Suffisante
$KGE \leq 0,50$	Non-suffisante

- **Le Pourcentage du biais (PBIAS)**

Le PBIAS est le biais du modèle, ou erreur de bilan, exprimée en pourcentage. Il permet de mesurer la tendance moyenne des valeurs simulées à être plus grandes ou plus petites que celle observées, en indiquant s'il y a surestimation ($PBiais > 0$) ou sous-estimation ($PBiais < 0$) du débit moyen par le modèle sur une période donnée. La valeur optimale du PBIAS est 0 avec des valeurs faibles d'amplitudes indiquant une simulation parfaite

$$PBIAS = \frac{\sum(Q_{sim}(i) - Q_{réf}(i))}{\sum Q_{réf}(i)} * 100 \quad (36)$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la zone d'études.

Ensuite, nous avons montré les différentes méthodes et les données que nous allons utiliser pour aboutir aux résultats attendus. Les différentes bases de données utilisées dans cette étude décrivent bien la variabilité des paramètres ainsi que leurs variations au cours du temps sur le bassin versant du Bafing et les méthodes présentées ont permis d'obtenir les différents résultats présentés (au chapitre III).

Chapitre 3 : Résultats et Discussions

Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus dans cette étude. Nous allons présenter les résultats obtenus durant le calage et la validation du modèles GR4J sur le Bassin versant du Bafing et d'évaluer la performance du modèle dans cette zone. En outre, les projections climatiques sur les variables climatiques (Précipitation, température et évapotranspiration) vont être détaillées. Enfin, s'en suivront les tendances des impacts potentiels du changement climatique sur les des débits futurs.

III.1. Calage et validation du modèle GR4J sur le Bafing

Cette partie analyse les résultats du calage et de la validation du modèle hydrologique GR4J alimenté avec les données observées aux stations hydrométriques de Daka Saidou et de Bafing Makana. Nous rappelons qu'avec ce modèle, nous essayons de reproduire le plus proche les débits moyens journaliers sur les périodes utilisées.

III.1.1. Hydrogramme observé et simulé pendant la période de calage

La figure 8 présente les hydrogrammes moyens journaliers simulés (couleur bleu) et observés (couleur rouge) du bassin versant de Bafing à la station de Daka Saidou et de Bafing Makana durant la période de calage (1984-1994). La forme des hydrogrammes moyens journaliers simulés est similaire à celle des hydrogrammes observés. Les débits de pointe (crues) de 1984, 1985 et 1993 ont été sous-estimés au niveau des stations de Daka Saidou et Bafing Makana. On constate aussi que les débits simulés et observés en période de calage sont plus importants à la station de Bafing Makana (environ 1500 m³ /s en moyenne) qu'à la station de Daka Saidou (environ 1100m³ /s en moyenne). Cela veut dire que la station de Bafing Makana, en plus d'être le point le plus bas du Bafing, est la station qui contrôle la majeure partie des eaux drainées par le bassin versant. Les hydrogrammes montrent une bonne correspondance entre les débits observés et simulés en période de calage sur les deux sous bassins.

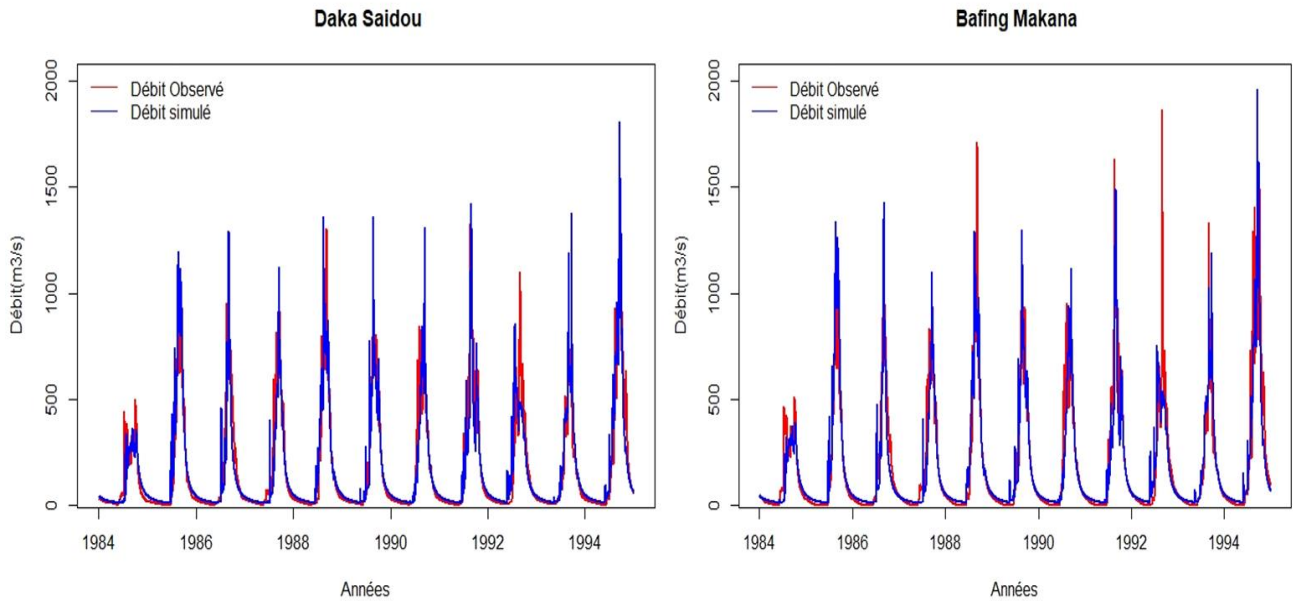


Figure 8 : Hydrogrammes moyens journaliers observés et simulés en période de calage

III.1.2. Hydrogrammes observés et simulés pendant la période de validation

L'analyse de la figure 9 (qui présente les hydrogrammes observés et simulés en période de validation 1996-2006) montre une bonne reproduction de la forme des hydrogrammes. En d'autres termes, nous notons une adéquation entre les débits simulés et observés au niveau des deux sous bassins versants (Bafing Makana et Daka Saidou). Les débits de pointe simulés sont bien situés dans le temps mais sont souvent sous-estimés. Pour les douze (12) années de validation, cinq (5) sont sous-estimées à la station de Daka Saidou et, huit (8) à la station de Bafing Makana. La sous-estimation des débits simulés par le modèle GR4J est plus marquée au Bafing Makana qu'à Daka Saidou.

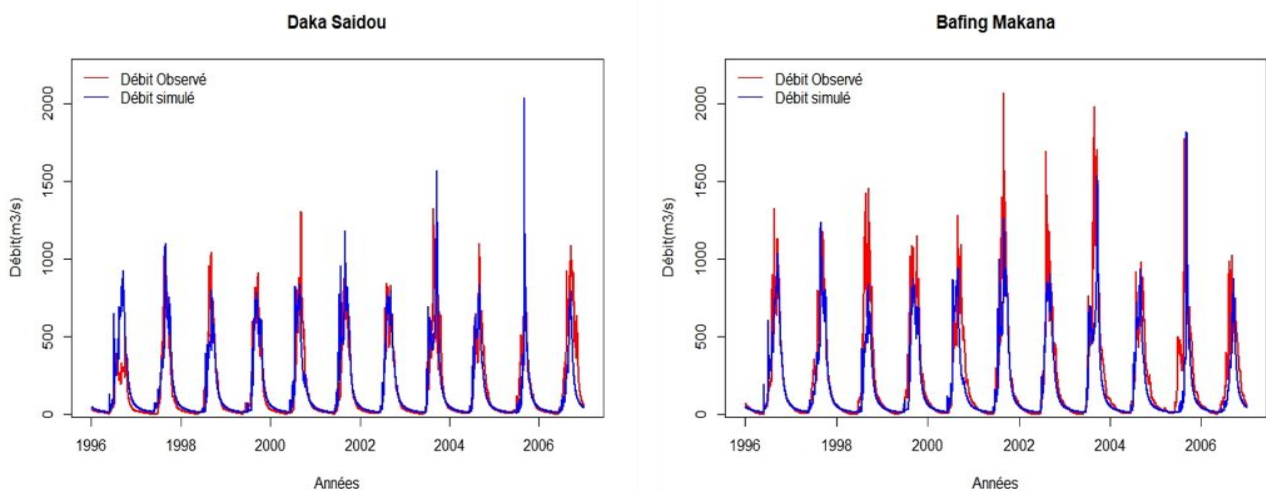


Figure 9 : Hydrogrammes moyens journaliers observés et simulés en période de validation

Globalement, en calage comme en validation, la forme des hydrogrammes observés est bien reproduite par le modèle mais aussi les débits d'étiage sont bien simulés. Cependant, force est de constater que le modèle a du mal à bien reproduire les pics de crue et parfois les incertitudes demeurent importantes (Bodian et al., 2012). En outre, les débits simulés et observés sont plus importants à la station de Bafing Makana qu'à la station de Daka Saidou. On remarque aussi que la valeur des débits simulés en période de validation est toujours plus importante que celle de la période de calibration. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle a été validé sur une période plus humide que la période de calibration. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Faty et al., 2017) qui montre une période sèche (1969-1990) dans le haut bassin et cette sécheresse est particulièrement plus accentuée au cours de la décennie 1980. Il faut noter aussi qu'en période de validation, la simulation est meilleure à Daka Saidou qu'au Bafing Makana. Cela est probablement dû à l'homogénéité du bassin qui suppose que le sous bassin Daka Saidou est plus homogène que celui de Bafing Makana.

III.1.3. Évaluation de la performance du GR4J

Dans cette étude, nous avons utilisé des critères statistiques d'évaluation de la performance du modèle GR4J : Critère de Kling-Gupta (KGE) et le pourcentage des Biais (PBIAS). Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 7 et 8. Il faut rappeler que la performance du modèle est jugée **non Suffisante** lorsque le Critère de Kling-Gupta ($KGE \leq 0.50$), **Suffisante** si $0,50 < KGE \leq 0.65$, **Bonne** lorsque $0,65 < KGE \leq 0.75$ et **Très Bonne** si $0,75 < KGE \leq 1$ (Gupta et al., 2009). Pour le PBIAS, la valeur optimale 0,0 indique une simulation précise du modèle, les valeurs positives indiquent un biais de surestimation et les valeurs négatives indiquent un biais de sous-estimation du modèle.

Tableau 7 : Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en calage

Période	Station	Paramètres				KGE	PBAIS
		X1	X2	X3	X4		
Calage	Daka	51.91	-25.48	700.19	1.203	0.9116	0.3
	Saidou	3					
	Bafing	34.91	-42.045	755.758	2.406		
	Makana	7				0.9097	0.2

Tableau 8 : Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en validation

Période	Station	Paramètres				KGE	PBIAS
		X1	X2	X3	X4		
Validation	Daka	51.913	-25.48	700.19	1.203	0.7294	-24
	Saidou						
	Bafing	34.917	-42.045	755.758	2.406	0.6621	-22.1
	Makana						

L'analyse des résultats montrent que le calage du modèle GR4J donne des valeurs de KGE supérieures à 0,75 dans les deux sous bassins (tableau 6) ; 0,9097 pour la station de Bafing Makana, et 0,9116 pour la station de Daka Saidou. Ces valeurs montrent une très bonne performance du modèle en calage. La phase de validation présente des valeurs de de Kling-Gupta de 0,7942 à Daka Saidou et 0,6621 au Bafing Makana (tableau 7). En effet, la baisse de performance du modèle, de la période de calage à celle de la validation est important avec une différence de 0,1822 à Daka Saidou et 0,2476 à Bafing Makana.

Pour le PBAIS, nous notons des valeurs positives en période de calage dans les deux sous bassins et des valeurs négatives en période de validation ; ce qui nous permet de dire que le modèle surestime les débits simulés en période de calage et sous-estime en validation. Ces résultats permettent d'affirmer que le modèle est plus performant en période de calage qu'en période de validation.

III.2. Cycle annuel de la précipitation et de la température avant et après la correction

La figure 10 montre une comparaison entre les données non corrigées et celles corrigées de la précipitation (figure 10a) et de la température (figure 10b) simulées avec la moyenne d'ensemble des sorties des modèles climatiques pendant la période historique. Ainsi la couleur bleue représente les données d'observation, la couleur verte, les données non corrigées et la rouge, les données corrigées. L'analyse de cette figure montre une nette amélioration des sorties corrigées par rapport aux sorties non corrigées. La sous-estimation des données non corrigées par rapport à l'observation a été considérablement réduite après la correction. En plus l'amplitude des sorties corrigées est supérieure à celle des sorties non corrigées, le signal est plus visible après la correction. D'après (Mbaye et al., 2015) la technique de correction appliquée aux sorties de modèles climatiques modifie l'amplitude du signal climatique.

En outre, si l'on compare la moyenne des simulations climatique corrigées à celle de l'observation, on constate de manière générale un accord assez bon. Cet accord n'est pas parfait, non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes mais encore certains extrêmes ne sont pas assez bien reproduits surtout pour les précipitations, ce qui montre que la méthode a des limites. En d'autres termes la correction des biais des sorties de modèle montre une valeur ajoutée malgré ses limites, d'où la pertinence de l'utilisation des données corrigées des modèles dans l'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant du Bafing. La même correction de biais appliquée aux simulations historiques est appliquée aux simulations du climat futur pour les scénarios SSP245 et SSP585.

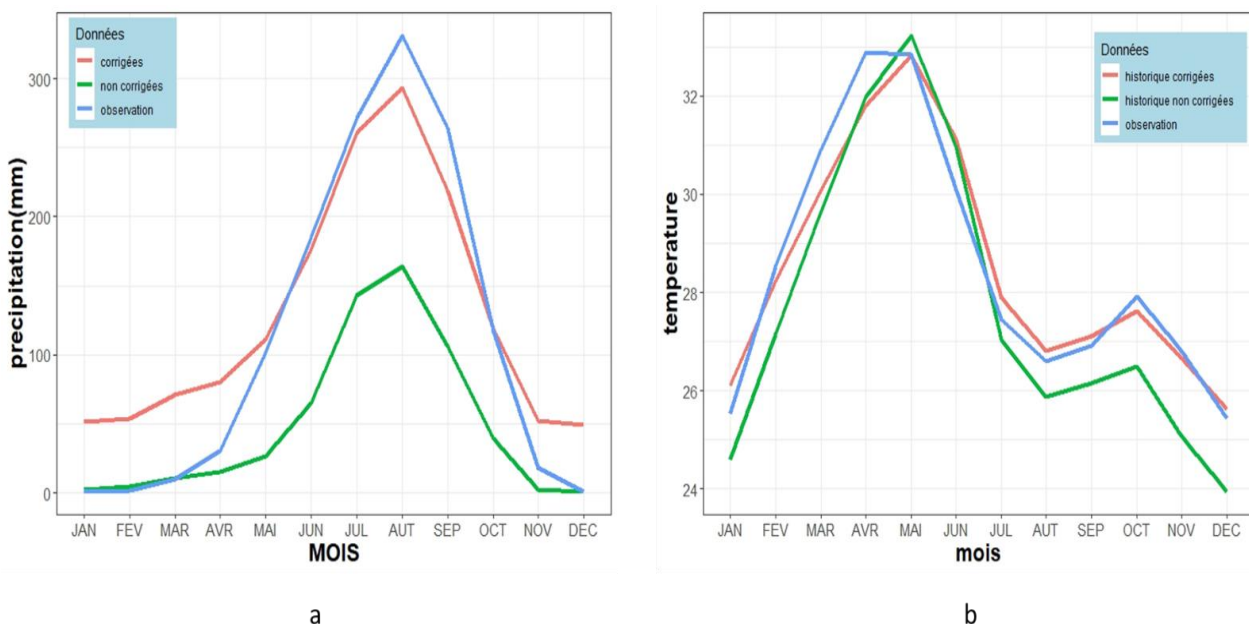


Figure 10: Cycle saisonnier de la précipitation et de la température avant et après la correction des biais

III.3. Projections Hydroclimatiques

Dans cette partie, nous avons utilisé des Modèles Climatiques Généraux (MCG) et leur moyenne d'ensemble pour étudier les tendances historiques et futures des paramètres climatiques. L'approche appliquée est de représenter les cycles saisonniers et les variations interannuel de la température, de l'évapotranspiration potentielle (ETP), de la précipitation et du débit moyen sur le Bafing sous les deux scénarios SSP245 et SSP585. Pour mieux illustrer les variations saisonnières pour les décennies à venir, d'abord nous avons calculé les différences de température entre les simulations sur les périodes future (Tf) et historique (Th) (c'est-à-dire ΔT absolu) ΔT absolu s'écrit : $T_f - T_h$. La même différence est appliquée sous forme de pourcentage (en faisant le rapport de cette différence sur l'historique) pour l'ETP, les précipitations et les débits futurs.

Ensuite, nous avons divisé la période future en deux sous périodes : 2022-2051 pour un futur proche (horizon 2050) et 2061-2090 pour le futur lointain (horizon 2090). Pour la période historique, nous avons pris 1981-2010 qui est la période de référence météorologique selon OMM.

III.3.1 Cycle saisonnier de la Précipitation

L'évaluation des changements climatiques, en particulier en ce qui concerne les précipitations varie d'un modèle à l'autre. Sa projection, sous les deux scénarios par les six modèles globaux utilisés (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 et FGOALS) montre des tendances différentes sur le bassin versant du Bafing.

La figure 11 nous montre les cycles saisonniers de la précipitation sous le SSP245 simulés par ses six sorties de MCG.

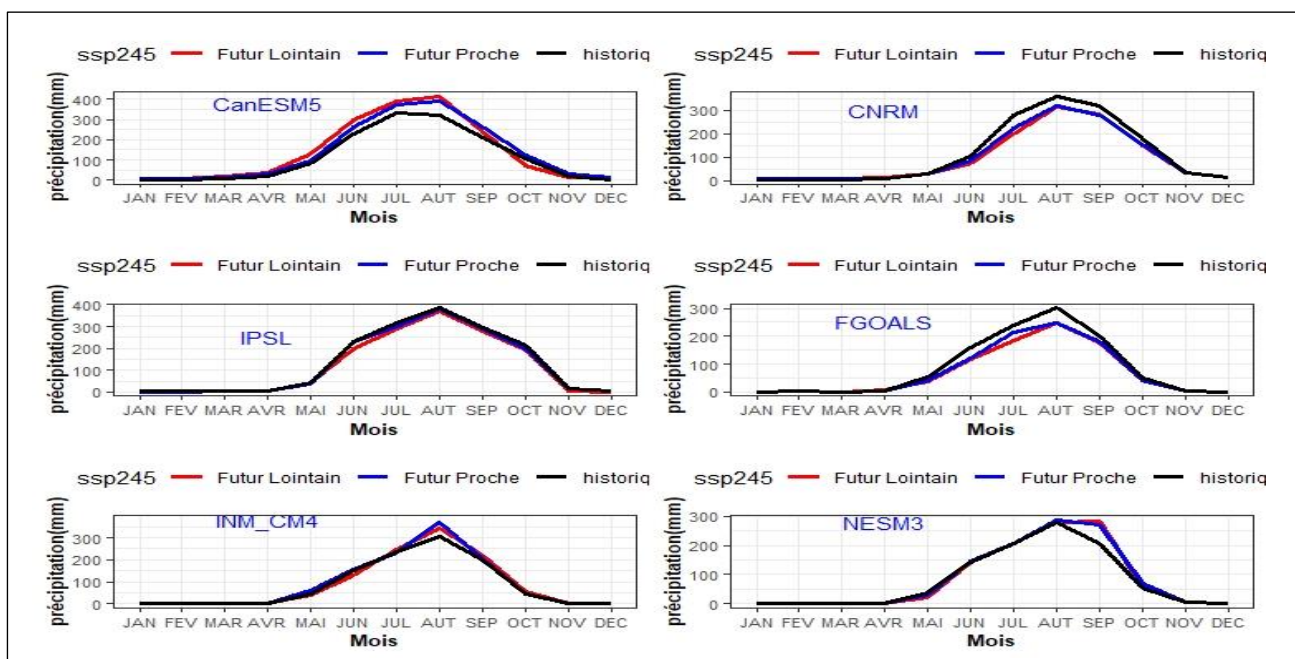


Figure 11: Cycle saisonnier de la Précipitation simulée par les six modèles sous le SSP245

L'analyse de la figure 11 montre que les modèles FGOALS et CNRM prévoient une baisse des précipitations durant presque toute l'année dans le futur proche comme dans le futur lointain avec un pic au mois d'Août, et le modèle IPSL aussi prévoit aussi une baisse de mai à Août. L'évolution des précipitations par les autres modèles ; CanESM5, NESM3 et INM_CM4 n'est pas homogène par rapport aux précédents, les modèles prévoient une hausse des précipitations durant presque toute l'année avec un pic important au mois d'Août. Cependant, l'augmentation est plus marquée par le modèle CanESM5. Ce dernier se caractérise par une reproduction de début précoce de la saison pluvieuse(mars). Ces résultats corroborent ceux de Camara et al.

(2013) qui ont montré que certains modèles ont la particularité de simuler une saison des pluies avec un début précoce et une fin également précoce.

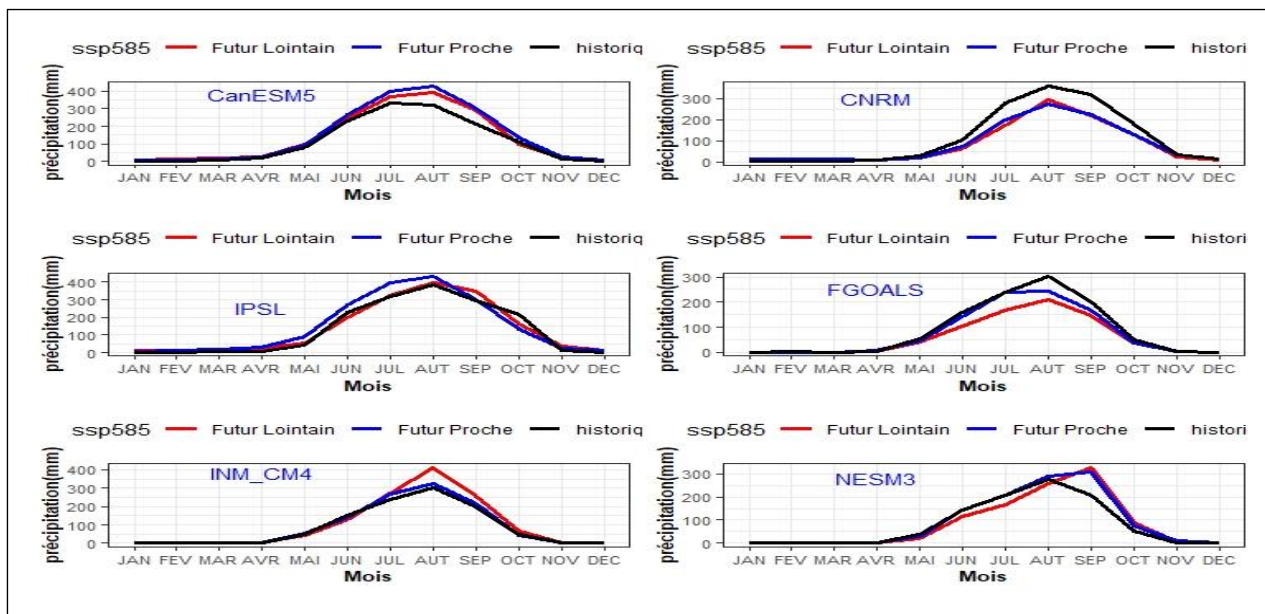


Figure 12 : Cycle saisonnier de la Précipitation simulées par les six modèles sous le SSP585

La figure 12 montre que le modèle CanESM5, prévoit une hausse des précipitations pour les mois de Juin, Juillet, Août et septembre dans le futur proche comme dans le futur lointain avec un pic au mois d’Août ; les modèles NESM3, INM_CM4 et IPSL prévoient aussi une légère augmentation (d’Août en octobre pour le NESM3, d’avril jusqu’au mois de septembre pour INM_CM4 et d’Août en septembre pour IPSL). L’évolution des précipitations par les autres modèles CNRM et FGOALS prévoit une baisse durant presque toute l’année avec un pic important au mois d’Août. Cependant, l’augmentation est plus marquée par le modèle CanESM5.

En somme les figures 11 et 12 montrent de fortes divergences entre les modèles, d’après Mahamadou et al. (2018) ces insuffisances remarquées au niveau de chaque modèle sont sûrement liées aux schémas de paramétrisations. Ces résultats sont en accord avec ceux conclut par Ardoin (2004) qui montre que les modèles climatiques ont la difficulté à reproduire la dynamique de la saison des pluies en plus de leur difficulté à reproduire les volumes précipités et la variabilité interannuelle.

La figure 13 représente le cycle saisonnier de la Précipitation simulé avec la moyenne d'ensemble des six modèles sous les SSP245 et SSP585.

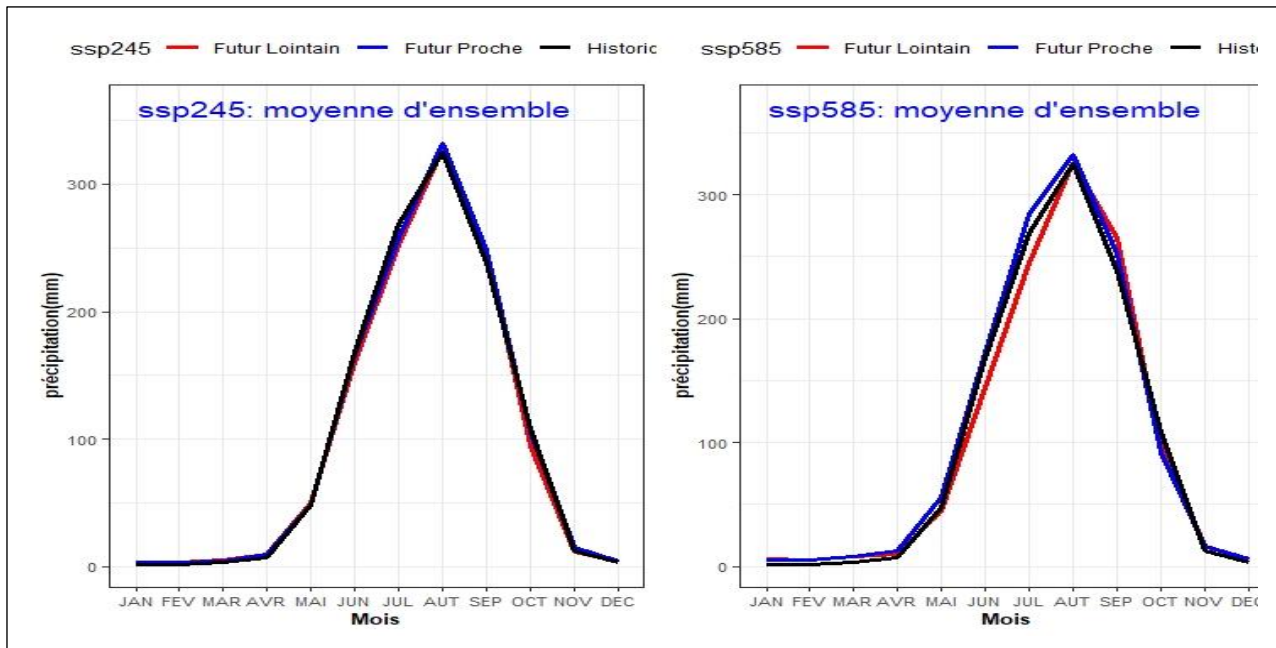


Figure 13 : Cycle saisonnier de la Précipitation simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles sous les deux scénarios (SSP245 et SSP585)

En effet on note une légère augmentation des précipitations mensuelles avec le SSP245 et SSP585 dans le futur proche (horizon 2050). En plus, une diminution des précipitations mensuelles dans le futur lointain (horizon 2090) surtout sous le SSP585. Ses variations sont plus importantes pendant les mois les plus pluvieux de l'année (juin, juillet, Août et septembre) avec un pic au mois d'Août. Cette différence entre les sorties des modèles climatiques est due aux différences de paramétrisations physiques et aux schémas de convection (Bodian,2011). Cela montre aussi les incertitudes liées aux projections, particulièrement sur les précipitations

III.3.2. Cycle saisonnier de la température moyenne

Tous les modèles climatiques prévoient une augmentation de la température pour les décennies à venir. Selon le modèle HadCM3-A2 cette augmentation peut atteindre jusqu'à 4°C en moyenne, sur l'ensemble de la surface terrestre et implique un accroissement de l'évapotranspiration potentielle (Ardoin,2004).

Les figures 14 ,15 et 16 représentent respectivement les cycles saisonniers de la température moyenne sur le bassin versant du Bafing sous les scénarios SSP245(figure14) et SSP585(figure15) simulés par les six MCG (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 et FGOALS) et leur moyenne d'ensemble sous les deux scénarios (figure16).

En effet, ces figures montrent une évolution similaire de la température pour l'ensemble des modèles sous les deux scénarios bien qu'il y ait une différence en termes d'amplitude. Tous les modèles utilisés prévoient une augmentation de la température durant toute l'année avec deux pics (mai et octobre).

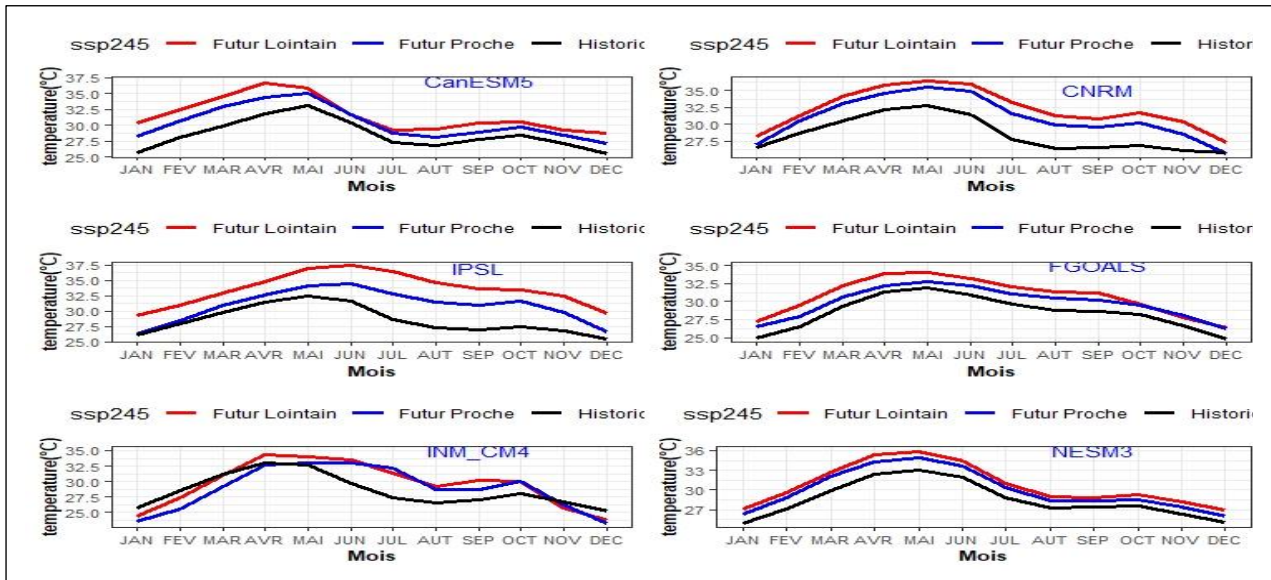


Figure 14 : Cycle saisonnier de la température simulées par les six modèles sous le SSP245

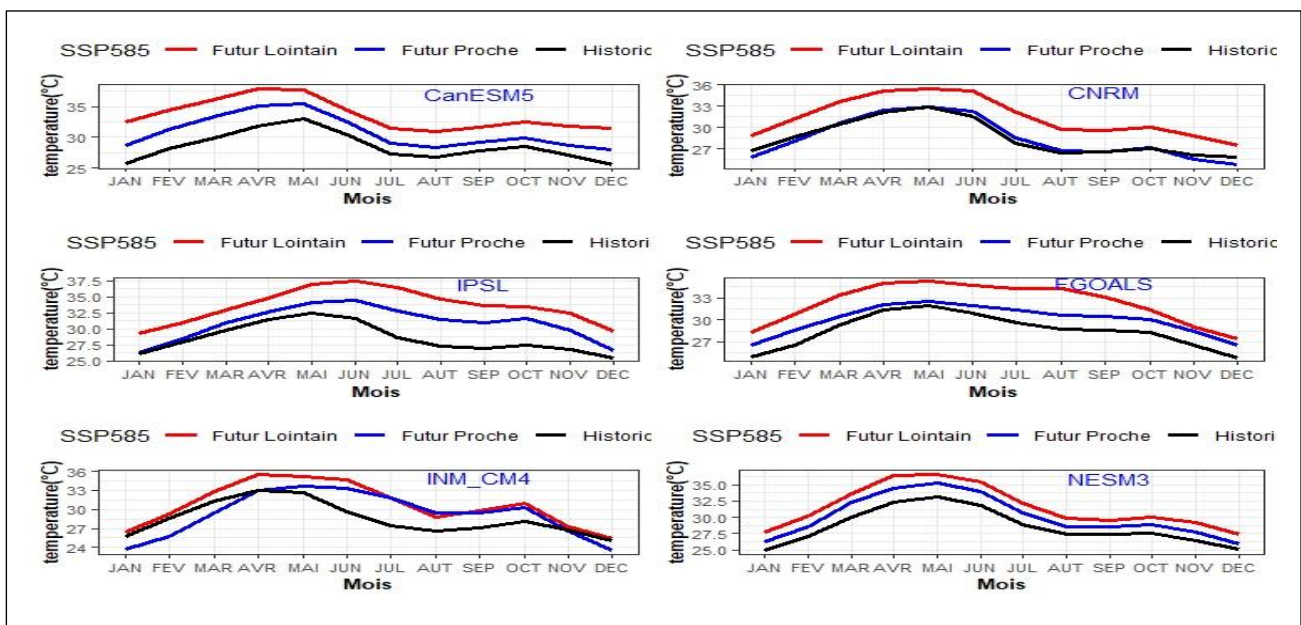


Figure 15 : Cycle saisonnier de la température simulées par les six modèles sous le SSP585

En outre, la moyenne d'ensemble (figure 17) montre que la température moyenne varie de 26 ° C à 35.2 ° C pour le SSP245 et jusqu'à 36°C sous le SSP585. La température maximale est observée au mois de mai (36°C avec le SSP585 et 35.2°C avec le SSP245), qui pourrait s'expliquer par un maximum de rayonnement solaire enregistré. De plus, une baisse considérable de la température est notée entre les mois de juillet, Août et Septembre avec le minimum enregistré en Août. Cette baisse correspond à la période la plus pluvieuse de la zone d'étude

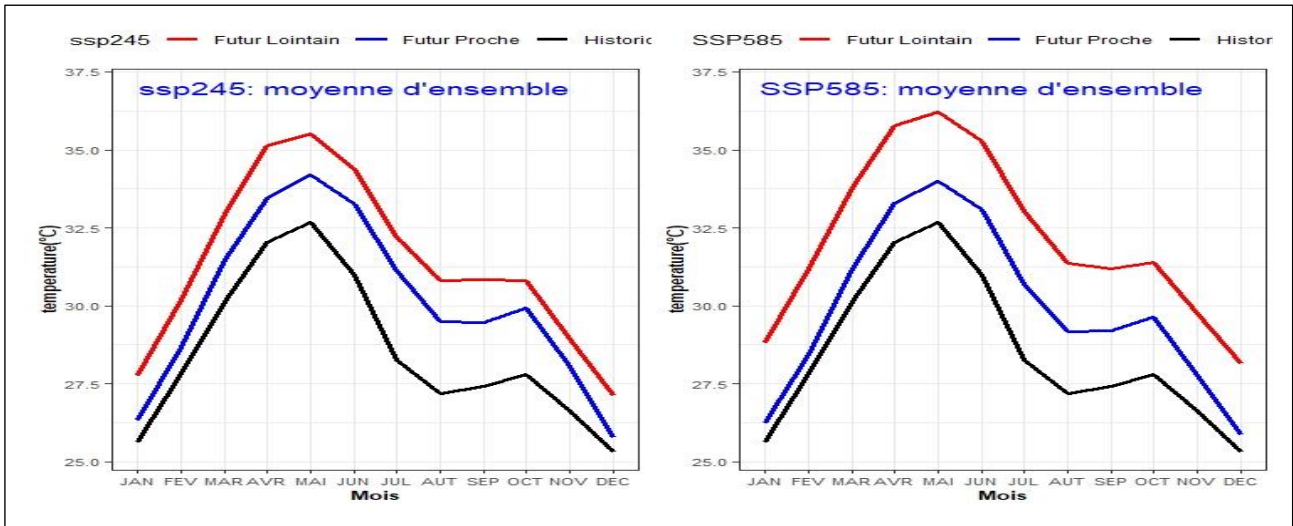


Figure 14 : Cycle saisonnier de la température moyenne simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles sous les ssp245 et ssp585

III.3.3. Cycle saisonnier de l'ETP

Les figures.17, 18 et 19 représentent respectivement le cycle saisonnier de l'ETP simulés par les six MCG (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 et FGOALS) sous le SSP245 (figure 17), SSP585(figure 18) et leur moyenne d'ensemble sous les deux scénarios (figure 19).

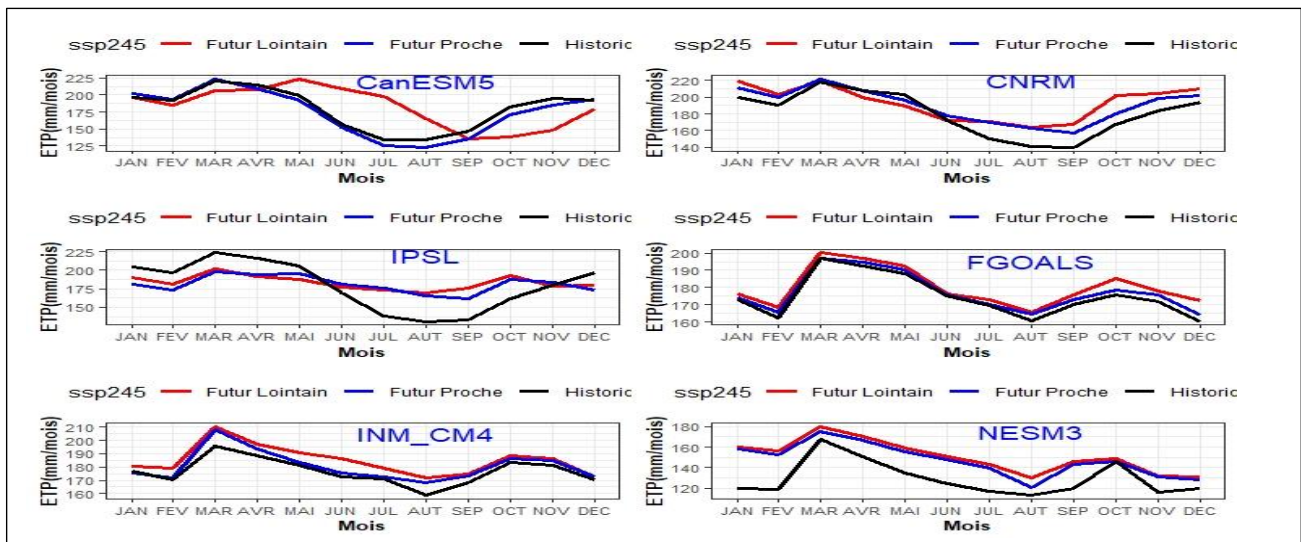


Figure 15 : Cycle saisonnier de l'ETP simulées par les six modèles avec le ssp245

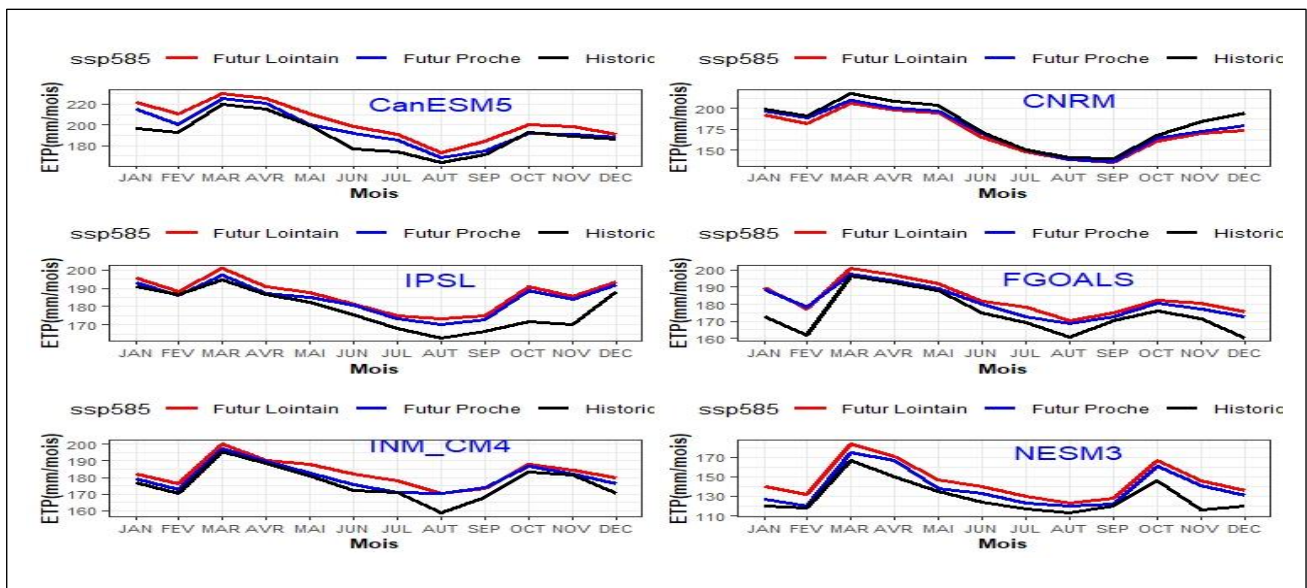


Figure 16 : Cycle saisonnier de l'ETP simulées par les six modèles avec le ssp585

Les figures 17 et 18 montrent une évolution similaire de l'ETP pour ces six modèles sous les deux scénarios bien qu'il y ait une différence en termes d'amplitude. On a constaté aussi que l'évolution de l'évapotranspiration potentielle est analogue à celle de la température ; elle présente un pic principal en mars et un autre pic secondaire en octobre. On note aussi une diminution considérable de l'ETP pour les mois de juin, juillet, août et septembre avec le minimum enregistré en août. Cependant, (Donohue et al., 2010) soulignent que l'augmentation de la température n'implique pas nécessairement une augmentation de l'ETP car beaucoup d'autres variables entrent en ligne de compte comme le vent, l'humidité relative et l'albédo.

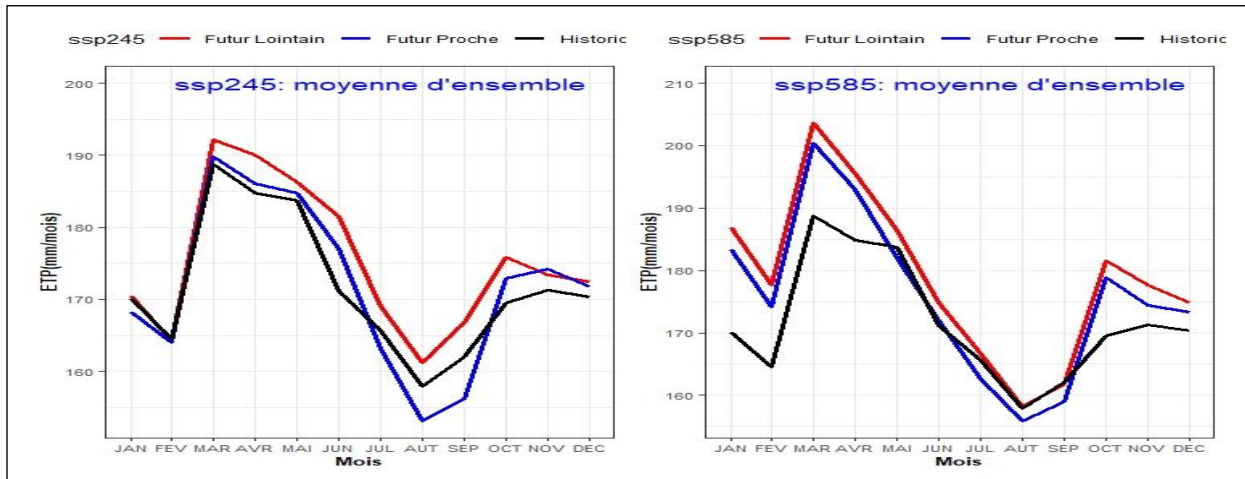


Figure 17 : Cycle saisonnier de l'ETP simulé avec la moyenne d'ensemble des modèles

En effet, pour le SSP245, tous les modèles prévoient une augmentation de l'ETP durant toute l'année, sauf le modèle IPS prévoit une diminution de janvier en mai et une hausse pour le reste de l'année dans ce même scénario. En outre, sous le SSP585, tous les modèles prévoient une augmentation de l'ETP durant presque toute l'année, sauf pour le modèle CNRM qui prévoit une diminution. En somme, la moyenne d'ensemble des modèles (figure 19) prévoit une augmentation de l'ETP sous les deux scénarios, cette hausse est plus importante dans le SSP585 que dans le SSP245.

III.3.4. Cycle saisonnier des débits moyens

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les débits futurs dans un bassin versant donné, la modélisation hydrologique est souvent utilisée pour simuler les écoulements. Les figures 20, 21, 22 et 23 montrent l'évolution des débits moyens mensuel pour les deux stations (Daka Saidou et Bafing Makana) du bassins versants du Bafing sous les scénarios SSP245 et SSP585 en utilisant les projections climatiques des différents modèles en entrée du modèle hydrologique GR4J.

Les figures 20 et 21 représentent les cycles saisonniers des débits simulés par les six modèles MCG (CanESM5, CNRM, IPSL, NESM3, INM_CM4 et FGOALS) respectivement sous les SSP245 et SSP585 à station de Bafing Makana.

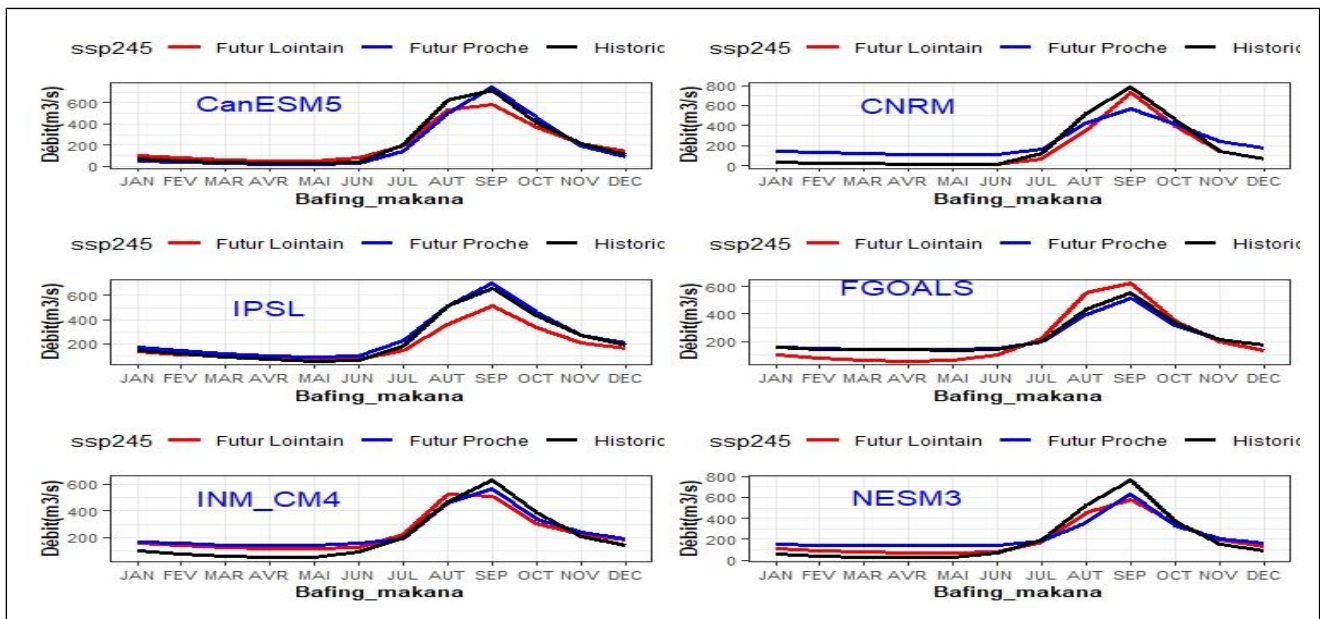
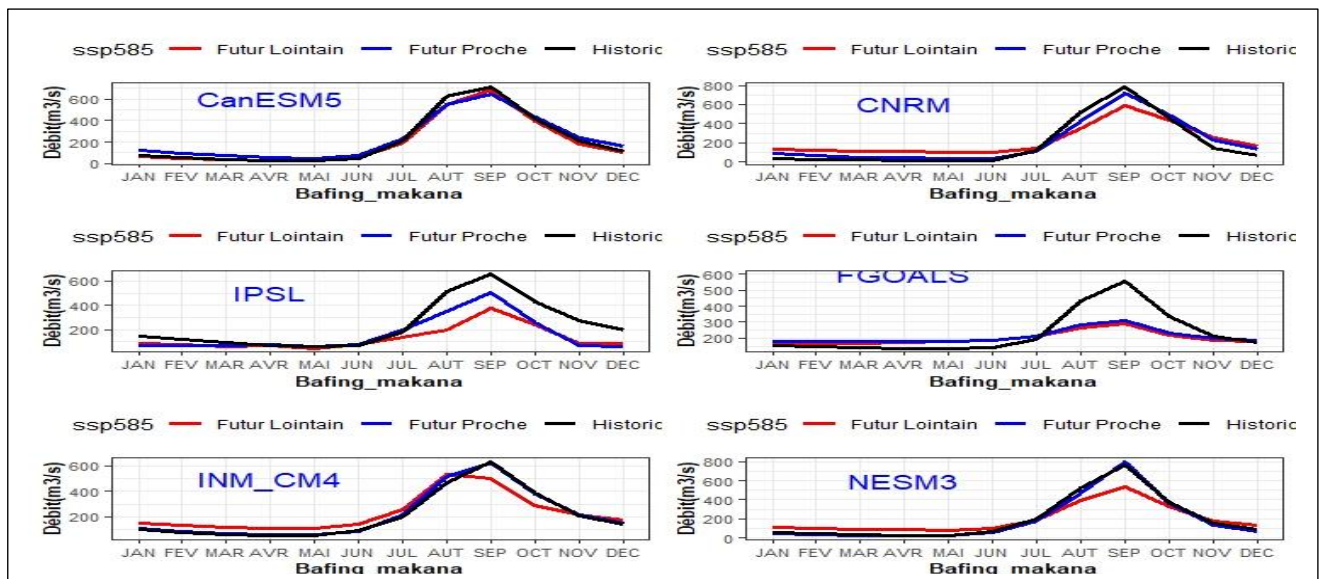


Figure 19 Cycle saisonnier des débits simulés par les six modèles sous les ssp585 comparés avec l'historique dans le sous bassin de Bafing Makana.



En effet, à la station de Bafing Makana, tous les modèles prévoient une diminution des débits moyens mensuels dans le futur proche (horizons 2050) comme dans le futur lointain (horizons 2090) sous les deux scénarios (SSP245 et SSP585) sauf pour le modèle FGOALS qui prévoit une augmentation sous le SSP245.

Les figures 22 et 23 montrent les cycles saisonniers des débits moyens simulés par ces six modèles à la station de Daka Saidou sous les SSP245 et SSP585.

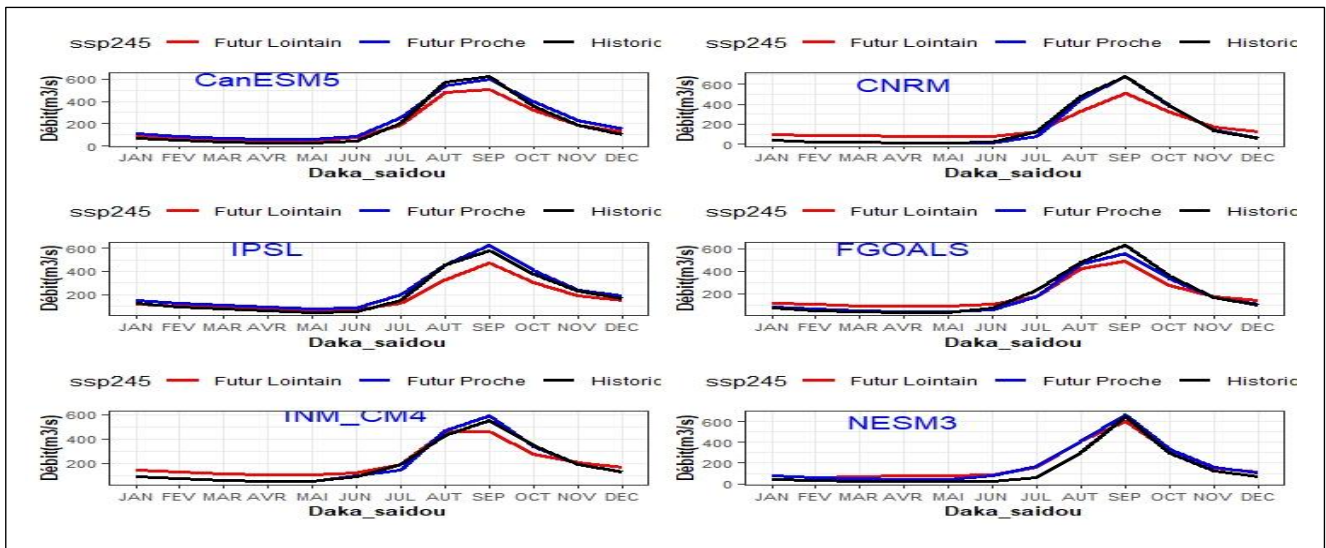


Figure 20 : Cycle saisonnier des débits simulés par les six modèles sous les ssp245 comparés avec l’historique dans le sous bassin de Daka Saidou

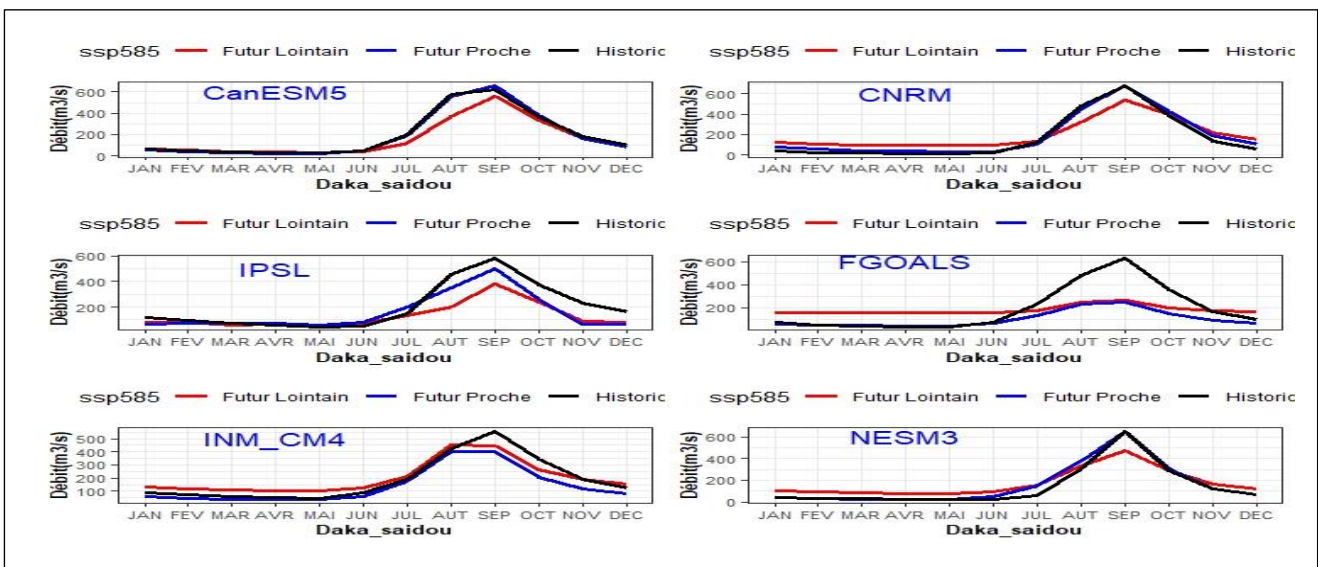


Figure 21 : Cycle saisonnier des débits simulés par les six modèles sous les ssp585 comparés avec l’historique dans le sous bassin de Daka Saidou.

En outre, à la station de Daka Saidou, tous les modèles prévoient une diminution des débits moyens mensuels sous les deux horizons (2050 et 2090) sous les scénarios SSP245 et SSP585. Cette diminution est généralement notée dans les mois les plus pluvieux de l’année (juin, juillet, août et septembre) car on note de légères augmentations pour les mois moins pluvieux.

En résumé, les résultats montrent une évolution similaire des écoulements dans les stations de Bafing Makana et de Daka Saidou. Dans l’ensemble, la comparaison des débits moyens mensuels projetés montre qu’il n’y a pas de modification du cycle saisonnier dans les deux sous

bassins. Cela voudrait dire qu'il n'aurait pas de modifications du régime hydrologique mais les amplitudes seraient modifiées dans les décennies à venir. Ainsi, globalement on assiste à une diminution des volumes écoulés pour l'ensemble des modèles pendant les mois d'août et de septembre, qui correspondent aux hautes eaux dans cette zone. La diminution dans les deux stations est plus importante avec le SSP585 (surtout avec les modèles IPSL et FGOALS) qu'avec le SSP245.

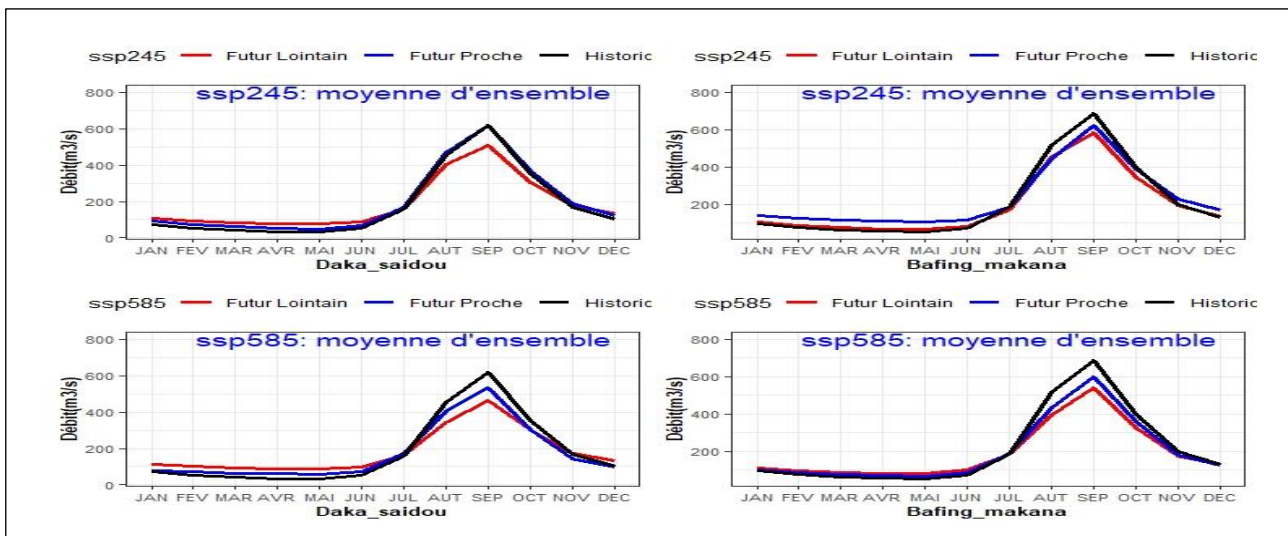


Figure 22 : Cycle saisonnier des débits simulés par la moyenne d'ensemble des six modèles sous les ssp245 et ssp585 comparés avec l'historique dans les stations de Daka Saidou et de Bafing Makana.

La figure 24 montre le cycle saisonnier des débits simulée par la moyenne d'ensemble des six modèles sous les scénarios SSP245 et SSP585 comparés avec l'historique dans les sous bassins de Daka Saidou et de Bafing Makana. Cette figure montre une diminution des débits aux horizons (2050 et 2090) dans les deux stations suivant les scénarios SSP245 et SSP585. Cette baisse des volumes écoulés est plus prononcée à Daka Saidou qu'à Bafing Makana. Ces résultats sont en accord avec ceux de Bodian., et al. (2012) qui montrent que les tendances à la baisse des débits sont attendues dans le haut Bassin du fleuve Sénégal notamment sur les bassins de Sokotoro, Daka Saidou et Bafing Makana à l'horizon 2030, 2060 et 2090 surtout à la station Daka Saidou.

III.3.5. Changement sur les paramètres climatiques

L'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre a profondément modifié les conditions climatiques à l'échelle locale et mondiale sur les dernières années. Même si le changement climatique au cours du XXI^e siècle se limite à une hausse moyenne des températures mondiales de 2 °C, conformément à l'objectif fixé par l'Accord de Paris 2015,

le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2018) prévoit un réchauffement plus important sur les terres émergées et des effets en cascade sur les systèmes naturels et humains, avec de forts risques de répercussions sur les écosystèmes, sur la santé et l'agriculture. La figure 25 montre les anomalies de la température de l'ETP de la précipitation et des débits moyens sous les SSP245 SSP585.

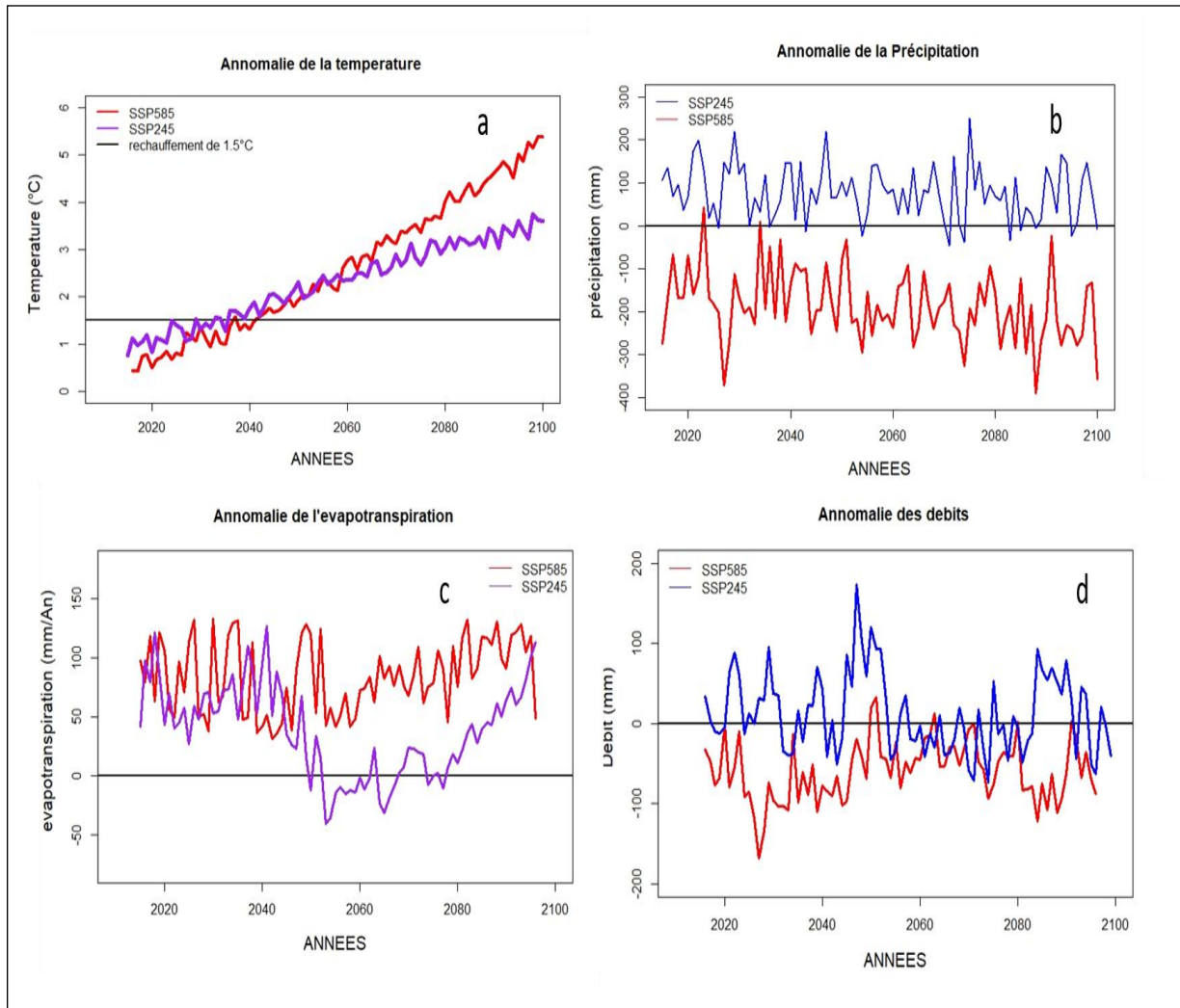


Figure 23 : Anomalies des températures, de l'ETP, Précipitations, et des débits Simulés avec la moyenne d'ensembles des six modèles MCG sous le SSP245 et SSP585.

En effet, la figure 25a montre des anomalies positives de la température entre 2015 et 2100 avec des valeurs qui varient de +0.7 à +5.5°C pour le SSP585 et de 0.8 à 3°C pour le SSP245. Cette anomalie positive traduit une augmentation sans cesse de la température moyenne sur le bassin versant du Bafing. On constate qu'à partir de 2040, pour les deux scénarios, les modèles prévoient des anomalies qui seront au-dessus d'un réchauffement de 1.5°C (ce qui est au-dessus de l'accord de Paris). L'augmentation est plus importante sous le **SSP585** (+1.39°C dans le futur proche (à l'horizon 2050) et +3.67 °C dans le futur lointain (à l'horizon 2090)) que pour

le **SSP245** (+**1.61**°C à l'horizon 2050 et **2.9** °C à l'horizon 2090). Ces résultats sont conformes aux projections du GIEC (rapport AR6 2021) qui prévoient une augmentation en fin de siècle de +1.4°C à +1.8°C pour le scénario d'émission de GES optimiste (SSP119 et SSP126), de 2.7 à 3.6°C pour les scénarios intermédiaires (SSP245, SSP370) et jusqu'à +4.4°C pour le scénario pessimiste (SSP585).

En outre, la figure 25b montre des anomalies positives de l'ETP pour les SSP585 et SSP245 mais on note aussi une anomalie négative entre 2050 et 2070 pour les SSP245.

De manière générale, on remarque une hausse de la température qui s'accompagne d'une augmentation de l'ETP dans cette zone. Cette augmentation de l'ETP est plus remarquable dans le SSP585 (**3.57%** à l'horizon 2050 et **+4.2 %** à l'horizon 2090) que pour le SSP245 (**+2.7%** à l'horizon 2050 et **+0.73%** à l'horizon 2090). Ces résultats sont en phase avec les études d'Ardoin et al., 2005 qui explique dans sa thèse que le réchauffement annoncé et les changements associés de l'humidité relative, de la vitesse du vent, et des rayonnements thermiques conduisent à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle sur toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Ensuite, la figure 25c montre des anomalies positives de la précipitation pour le SSP245 et des anomalies négatives pour le SSP585 durant la période de 2015-2100. Ces valeurs traduisent une augmentation des précipitations avec le SSP245 (**+4.35 %** à l'horizon 2050 et **+2.51 %** à l'horizon 2090) bien qu'il y ait quelques années déficitaires (2055, 2072 et 2074) et une diminution des précipitations annuelles avec le SSP585 (**-10.84 %** à l'horizon 2050 et **-15.86 %** à l'horizon 2090). En fin, la figure 25d montre une augmentation des débits moyens annuels sur le bassin versant de Bafing avec le SSP245 bien qu'il ait une période de diminution (2055-2081). Pour le SSP585, cette figure montre une diminution des débits durant toute la période (2015-2100). En somme la moyenne d'ensemble des modèles prévoit une augmentation des débits moyens de +7.8% à l'horizon 2050 et une légère diminution de -0.77% à l'horizon 2090 pour le SSP245 et une diminution de -19.77% à l'horizon 2050 et de -13.52% à l'horizon 2090 pour le SSP585.

En résumé, pour le SSP245, nous notons une augmentation de la température moyenne, de l'ETP, de la précipitation et des débits moyens. Pour le SSP585, une augmentation de la température moyenne, de l'ETP, une diminution de la précipitation et une diminution des débits sont notés dans cette zone. L'augmentation du débit dans le futur sous le SSP245 où sa diminution sous le SSP585 projeté avec les modèles est probablement liée à l'augmentation (ou diminution) des précipitations projetées par les mêmes modèles. Ce qui nous permet de dire que les écoulements sont très sensibles aux variations des précipitations surtout pour les modèles pluie-débit. Cette remarque est en phase avec celle de (Ardoin et al., 2005) qui souligne

qu'un excès (déficit) de précipitations selon les scénarii climatiques se traduit par une augmentation (diminution) des débits pour la majorité des bassins versants, quelle que soit l'évolution de l'ETP et donc des températures.

III.3.6. Impacts du changement climatique sur les débits du Bafing

L'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau est un enjeu important. En effet, la gestion optimale de la ressource en eau, en quantité comme en qualité, est une condition essentielle du développement durable au Sénégal.

Cette partie vise essentiellement à donner une idée sur les impacts potentiels d'un changement climatique sur l'évolution future des débits du haut bassin. Ainsi, les sorties (précipitations et ETP) de six modèles climatiques sous les scénarios SSP245 et SSP585 sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR4J pour simuler les écoulements au cours du siècle à venir.

III.3.6.1 Tendances moyennes des débits futurs

La figure 26 présente les tendances moyennes des débits futurs à la station de Bafing Makana (figure : 26a et figure :26b) et de Daka Saidou (figure :26c et 26d) sous les deux scénarios par rapport à l'historique. L'évolution des débits projetés montre un comportement similaire à Bafing Makana et à Daka Saidou avec des amplitudes différentes. L'analyse des figures nous montre que la valeur médiane des box-plots est variable d'une période à l'autre suivant les deux stations. En effet, à l'horizon 2050, les valeurs médianes obtenues pour le SSP245 (230m³/s et 190 m³/s) sont plus grandes que celle obtenue avec l'historique (205 m³/s et 170 m³/s) respectivement à la station de Bafing Makana et de Daka Saidou. Par contre ces valeurs médianes diminuent par rapport à l'historique sous le SSP585 dans les stations de Bafing Makana et de Daka Saidou avec des valeurs respectives 180m³/s et 155 m³/s.

En outre, à horizon 2090, à la station Bafing Makana, la valeur médiane diminue dans les deux scénarios (200 m³/s sous le SSP245 et 185 m³/s sous le SSP585) avec des valeurs inférieures à l'historique (205 m³/s). Dans la station Daka Saidou, toujours à l'horizon 2090, la valeur médiane des box plots dans la période historique est légèrement inférieur à la valeur obtenue pour le SSP245 (180 m³/s) et supérieure à celle obtenue pour le SSP585 (155 m³/s).

En résumé, dans les deux stations, on peut dire que la valeur médiane des box-plot augmente légèrement dans les deux horizons pour le SSP245 sauf à horizon 2090, on note une diminution à la station de Bafing Makana. Pour le SSP585, suivant les deux horizons, la valeur médiane diminue dans les deux stations. Cette diminution est plus importante à la station de Daka Saidou que dans celle de Bafing Makana.

En somme, pour le SSP245, la différence relative de la moyenne d'ensemble des modèles prévoit une augmentation des débits moyens de +8.42% à l'horizon 2050 et de +3.313% à l'horizon 2090 à la station de Daka Saidou. Une augmentation +3.83% à l'horizon 2050 et une diminution de -3.64% à l'horizon 2090 à la station de Bafing Makana. Pour le SSP585, on note une diminution de de -24.31% à l'horizon 2050 et de -11.70% à l'horizon 2090 dans la station de Daka Saidou. Une diminution -10.18% à l'horizon 2050 et une diminution de -12.28% à l'horizon 2090 à la station de Bafing Makana. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Bodian et al., 2012), qui montrent que les modèles (HADCM3, CSMK3, MPEH5 et NCPCM) prévoient une baisse des écoulements allant de -0.7 % à -14.1 % à l'horizons 2060 et de -10.59 % et -25.2 % à l'horizon 2090 dans le haut bassin du fleuve Sénégal.

Ces résultats indiquent que la disponibilité de la ressource en eau de surface du bassin versant du Bafing devrait continuer à décroître d'ici la fin du 21ème siècle surtout avec le SSP585. Le sous bassin Daka Saidou semble le plus vulnérable au changement climatique simulé par les MCG, compte tenu d'une diminution plus importante des précipitations.

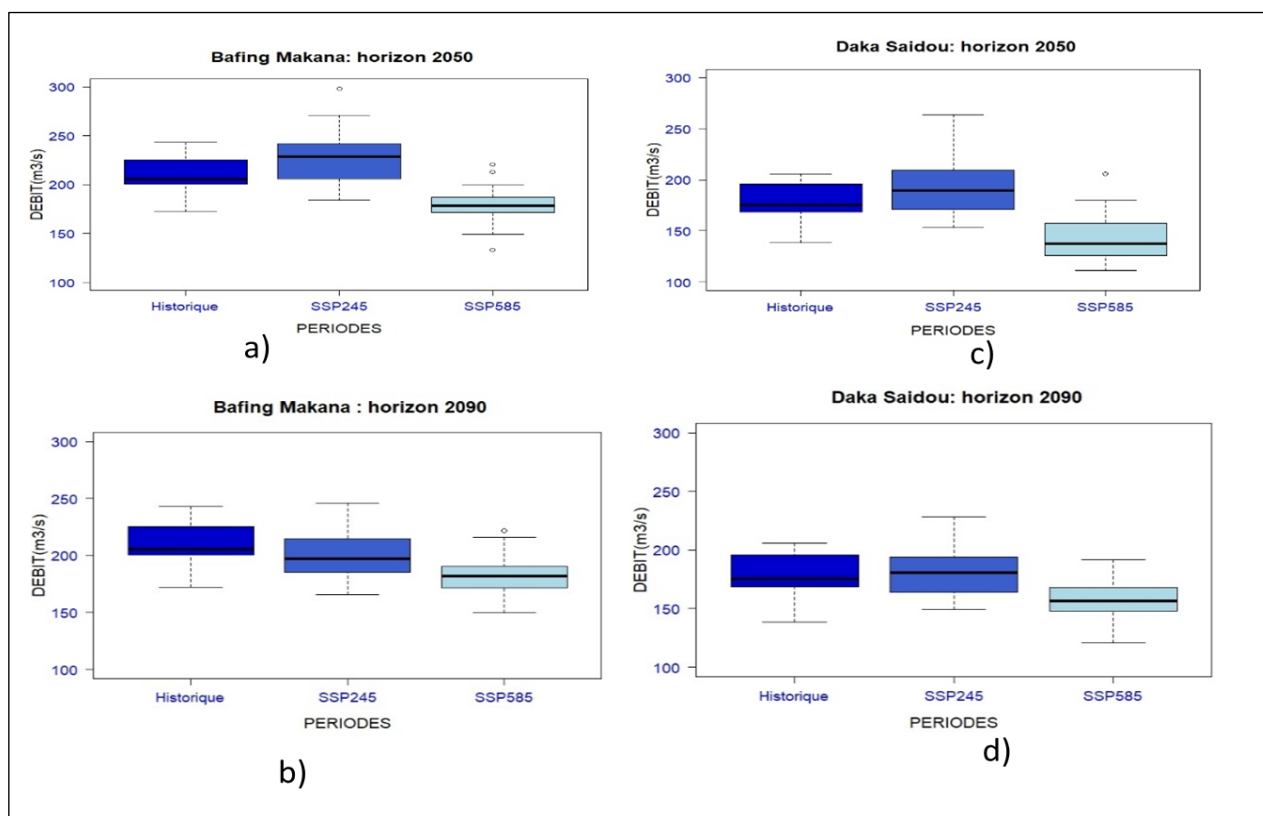


Figure 24 : Évolution moyenne annuelle des débits simulés par le modèle GR4J avec la moyenne d'ensemble des six sorties des MCG sous le ssp245 et ssp585 comparés avec l'historique à station de Bafing

III.3.6.2. Changement sur les débits extrêmes

L'analyse des tableaux 9 et 10 nous montre des changements importants sur les valeurs extrêmes des débits pour les décennies à venir.

En effet, on remarque que la valeur moyenne des faibles débits (Q_{05}) augmente à la station Daka Saidou suivant les deux scénarios. Par contre à la station de Bafing Makara, on note une augmentation avec le SSP245 et une diminution avec le SSP585. Ensuite, pour les débits moyens (Q_{50}), on note une augmentation de la valeur moyenne sur les deux stations sous les scénarios. En outre, pour les hauts débits (Q_{95}), il y a une augmentation sous le scénario SSP245 et une diminution sous le scénario SSP585 à la station de Bafing Makana. Par contre à la station de Daka Saidou les forts débits diminuent sous les deux scénarios. En général, la moyenne d'ensemble des six modèles utilisés prévoit une augmentation des faibles et moyens débits et une diminution des forts de débits dans le bassin versant du Bafing sous les deux scénarios. Ces résultats montrent que les forts débits sont plus affectés par les Changements climatiques surtout à la station de Daka Saidou qui semble être plus vulnérable où on note une diminution qui peut aller jusqu'à -28.17%. En résumé, on peut dire que la disponibilité des ressources en eau de surface dans cette zone est menacée du fait des diminutions projetées des écoulements de surface. Cette baisse des débits est probablement liée à la hausse de l'ETP combinée à la baisse des précipitations prévue dans le futur par les modèles. Il faut noter que les baisses les plus considérables sont attendues avec le SSP585 qui est le scénario le plus pessimiste des nouveaux scénarios.

Tableau 9 : Changement sur les débits extrêmes dans la station de Bafing Makana

Percentiles	Bafing Makana m3/s			Changement en %	
	Historique	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585
Bas débit Q_{05}	30.05	45.06	28.74	+49.95%	-4.35%
Débit moyen Q_{50}	82.82	119.84	97.31	+44.7%	+17.49%
Haut débit Q_{95}	519.65	568.80	437.73	+9.45%	-15.76%

Tableau 10 : Changement sur les débits extrêmes dans la station de Daka Saidou

Percentiles	Daka Saidou m3/s			Changement en %	
	Historique	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585
Bas débit Q_{05}	49.77	60.62	65.65	+21.8%	+31.9%
Débit moyen Q_{50}	106.92	132.024	120.19	+23.47%	+12.41%
Haut débit Q_{95}	690.26	622.24	495.78	-9.85	-28.17%

Conclusion

Dans cette dernière partie du travail, nous avons essayé d'évaluer les impacts potentiels d'un changement climatique sur l'évolution des ressources en eau de surface en utilisant les sorties de six modèles climatiques. Les résultats ont montré une grande variabilité hydroclimatique dans le bassin versant du Bafing qui est marqué par une hausse de la température et de l'ETP et une diminution des précipitations et des débits dans les décennies à venir en général.

Conclusion générale et perspectives

L'intérêt de cette étude est de chercher à mieux comprendre la variabilité hydroclimatique passée et future dans le bassin versant du Bafing et les impacts potentiels de cette variabilité sur les ressources en eau de surface. Cette étude nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions concernant d'abord le calage-validation du modèle hydrologique GR4J avec les données d'observation puis concernant l'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant du Bafing sous les scénarios climatiques SSP245 et le SSP585. Pour le calage-validation, les valeurs des critères statistiques d'évaluations obtenues en calage comme en validation témoignent de la performance et de la robustesse du modèle GR4J sur ce bassin versant. Aussi, un meilleur ajustement entre les débits observés et les débits simulés par le modèle a été observé à travers les hydrogrammes simulés et observés. Les régimes hydrologiques du bassin ont été assez bien reproduits par le modèle hydrologique. Cela signifie que ce modèle peut être utilisé pour reconstituer des séries de données historiques manquantes dans des bassins versants non jaugés ; il peut aussi aider à la prise de décision dans la gestion et la planification des ressources en eau de surface.

Pour les projections futures du climat du bassin, tous les modèles prévoient une hausse générale des températures et de l'ETP d'ici à la fin du 21ème siècle sous les scénarios SSP245 et SSP585. Pour les précipitations, les modèles CanESM5, IPSL, INM_CM4 prévoient une légère augmentation sous les scénarios SSP245 et SSP585. Les FGOALS, CNRM, NESM3 révèlent une baisse importante des précipitations sur toute l'étendue du bassin versant sous les deux scénarios (SSP245 et SSP585). La moyenne d'ensemble des modèles prévoit une légère augmentation de la précipitation sous scénario SSP245 et une baisse sous le SSP585. Quant aux débits moyens annuels et mensuels, ils pourraient baisser sur l'ensemble du bassin dans les décennies à venir (horizon 2050 et 2090) par rapport aux forçages des simulations issues des modèles CanESM5, CNRM, IPSL, FGOALS, INM_CM4, NESM3 et la moyenne d'ensemble sous le SSP245 et SSP585. Globalement on assiste à une diminution des volumes écoulés pour l'ensemble des modèles pendant le mois d'Août et de septembre, correspondant aux périodes de hautes eaux dans cette zone. Cette baisse des volumes écoulés est plus prononcée à Daka Saidou qu'à Bafing Makana. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Bodian et al., 2012) qui prévoient une diminution des écoulements dans le haut bassin du fleuve Sénégal surtout à la station Daka Saidou. Il faut noter que les résultats obtenus au terme de ce travail de master, présentent certaines limites et incertitudes liées à la qualité des données d'observation, à la correction des biais, aux projections climatiques, au modèle hydrologique, etc.

À partir de ces résultats nous prévoyons d'approfondir ce travail avec l'utilisation d'autres modèles climatiques régionaux, différentes méthodes de correction de biais des sorties climatiques. Ensuite utiliser d'autres modèles hydrologiques comme GR5J, GR6J, SWAT, etc. et de faire une étude de sensibilité des paramètres de ces modèles à différentes formules de calcul de l'ETP. En outre, il serait intéressant aussi d'étudier les événements extrêmes hydrométéorologiques. Compte tenu de ces résultats, des recommandations ont été formulées pour atténuer les impacts potentiels du changement climatique sur le bassin du Bafing.

Ces résultats montrent que les ressources en eau de surface du bassin versant du Bafing, pourraient être considérablement affectées par le changement climatique. C'est ainsi qu'il faudrait développer des stratégies d'adaptations au changement climatique en tenant compte de l'augmentation de la température, de la baisse des précipitations et des débits. Pour réduire la vulnérabilité des populations et des ressources du bassin face au changement climatique, il est recommandé de :

- Intégrer la modélisation hydrologique et hydrogéologique, les informations climatiques et démographiques dans les projections de l'évaluation de la disponibilité des ressources en eau ;
- Utiliser les résultats issus de recherche dans les processus de gestion et de planification des ressources en eau ;
- Mettre en place des techniques de collecte, de stockage et de conservation des eaux de pluviales ;
- Développer un bon système de drainage pluvial qui intègre la dimension climatique dans le dimensionnement des ouvrages ;
- Fixer des débits d'exploitation à ne pas dépasser et suivre le prélèvement des eaux souterraines ;
- Optimiser l'irrigation par un pilotage efficace et des techniques utilisatrices de moins d'eau (Exemple : le goutte à goutte) ;
- Limiter l'utilisation des eaux souterraines pour l'agriculture ;
- Promouvoir la gestion intégrée et concertée des ressources en eau ;
- Promouvoir l'assainissement urbain et rural pour limiter la pollution des ressources en eau ;
- Doter les établissements universitaires et instituts de recherche de moyens techniques et financiers pour intensifier la recherche dans le domaine de la modélisation des processus hydrométéorologiques et de leurs impacts.

Bibliographie

Ardoin B., 2004 : Variabilité hydroclimatique et impact sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques de, zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 440 pages. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00568025>.

Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., & Mahé, G. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique. Regional Hydrological Impacts of Climatic Change: Hydroclimatic variability,194. <https://iahs.info/uploads/dms/13209.28%20194-202%20Foz%20S6-2-28%20%20Ardoin.pdf>.

Bamba S.B, 1987 : Le bilan de l'eau et de la matière dans le haut bassin guinéen du fleuve Gambie. Thèse 3e cycle, Géologie, Université de Dakar, 147 pages.

Bamba F, Baldé C, 2005 : Étude du système guinéen actuel de contrôle des ressources en eau (quantité/qualité) en général et du fleuve Sénégal en particulier, rapport, 111 pages.

Barrat J. M., 2012 : Changement climatique en Afrique de l'Ouest et Conséquences sur les Eaux Souterraines, Rapport OSSI-GICRESAIT no 13, 41p.

Bates, B. C., Kundzewicz Z. W., Palitikof J. P., éd., 2008 : Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-fr.pdf>.

Bader J. C., Monographie hydrologique du fleuve Sénégal : de l'origine des mesures jusqu'en 2011. Marseille : IRD, 2015.

Beny, F., Canas, S., Persoz, L., Tuel, A., Chavanne, M., Deutsch, D., ... & Gillet, P. (2021). Synthesis of IPCC's AR6 report published in August 9, 2021. Digest synthesis of the Summary for Policymakers' of AR6 Working Group I. <https://theshiftproject.org/uploads/2021/08>.

Bodian A. ,2011 : Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat, Université, Cheikh Anta Diop de Dakar, 288 pages. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2561>.
Bodian A.,2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, p 297-312.

Bodian, A., Dacosta, H., & Dezetter, A. (2011). Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 5), 107-124. doi : [10.4000/physio-geo.1958](https://doi.org/10.4000/physio-geo.1958)

Bodian, A., Dezetter, A., & Dacosta, H. (2012). Apport de la modélisation pluie-débit pour la connaissance de la ressource en eau: application au haut Bassin du Fleuve Sénégal. *Climatologie*, 9, 109-125. <https://doi.org/10.4267/climatologie.223>

Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Impacts futurs du changement climatique sur les débits des deux principaux bassins fluviaux d'Afrique de l'Ouest : le Sénégal et la Gambie. *Hydrologie*, 5 (1), 21 . [doi: 10.3390/hydrology5010021](https://doi.org/10.3390/hydrology5010021)

Bouraima A W W., 2010. Analyse de la Variabilité Hydro-Climatique passée dans le haut bassin de l'oueme à Beterou au Benin, 53p.

Camara M., Diedhiou A., Sow B. A., Diallo M. D., Diatta S., Mbaye I., Diallo I., 2013. Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest, *Sècheresse*, Volume 24, Numéro1, DOI : 10.1684/sec.2013.0375, 17P.

Coly A., (1996) : Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégré Thèse 3ème cycle, UCAD, 308 pages.

Coly A, Ould Soufi B, Camara E, Diallo M.A, Lakh M., (2005) : Etude comparative des systèmes utilisés par les Etats membres de l'OMVS et l'organisation elle-même avec l'utilisation du système d'indicateur mise en place à l'Observatoire de l'environnement de l'OMVS, 83 pages.

Donohue, R.J., Mc Vicar, T.R., Roderick, M.L., 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology*, 386, 186–197

Dione O, (1996) : Évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 pages.

Faty A.,2018 : Modélisation hydrologique du haut bassin versant du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité hydroclimatique : Apport de la télédétection et du modèle Mike SH. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 238 pages.

Faty A., Kane C, Kouame F., Fall A., Kane A.,2017 : Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 2000 et 2014 dans le haut bassin versant du fleuve du Sénégal à partir des images Landsat - Ressources en Eau & Changement Climatique Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau Volume III : Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques Eau–Société–Climat'2017 (ESC-2017) Hammamet le 2, 3 et 4 Octobre 2017.

Faty, A., Kane, A., & Ndiaye, A. (2017). Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 30(2), 79-87. <https://doi.org/10.7202/1042915ar>.

Faye C., 2015 : Échange de données et d'informations relatives aux aléas climatiques et aux stratégies d'adaptation dans le bassin du fleuve Sénégal. *Geo-Eco-Trop.*, 2015, 39, page 139-150.

Faye C., 2015 : Impact du changement climatique et du barrage de Manantali sur la dynamique du régime hydrologique du fleuve Sénégal à Bakel (1950-2014). *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. <https://doi.org/10.4000/belgeo.17626>

Faye C., Sow A. A., et Ndong J. B., 2015 : « Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal », *physio-geo*, n° Volume 9, p. 17-35, janv. 2015, doi: 10.4000/physio-geo.4388.

Faye C., Diop E. H. S., et Mbaye I., « Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés », *Belgeo. Revue belge de géographie*, n° 4, Art. n° 4, déc. 2015, doi: 10.4000/belgeo.17626

Gac J. Y., Carn M., Orange D, (1991) : Données hydroclimatiques et géochimiques sur le bassin versant du fleuve Sénégal et sur la Guinée (Tome 1). Rapport multigr., ORSTOM. Rapport CEE, projet EQUÉSEN, 87 pages.

GIEC., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, www.ipcc.ch

GIEC., 2014. Incidences, adaptation et vulnérabilité : résumé à l'intention des décideurs, Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

Giec., 2022 : « une nouvelle alerte face au réchauffement climatique », vie-publique.fr. [https://www.vie-publique.fr/en-bref/284117-rapport-2022-du-giec-nouvelle alerte-face-au-rechauffement-du-climat](https://www.vie-publique.fr/en-bref/284117-rapport-2022-du-giec-nouvelle-alerte-face-au-rechauffement-du-climat) (consulté le 18 mai 2022).

Kane H, Diallo A, (2005) : Étude portant sur l'évaluation de l'état de l'environnement des ressources naturelles et des ressources en eau dans la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal, en se servant du système d'indicateurs de l'Observatoire de l'environnement de l'OMVS, 154 pages.

Klemeš V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal*, 31:1, 13-24, DOI: 10.1080/02626668609491024

Kodja, D. J. (2018). Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest (Doctoral dissertation, Université Montpellier ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin)).

Koenig D., Diarra T., 1998 : Les enjeux de la politique locale dans la réinstallation : stratégies foncières des populations réinstallées et hôtes dans la zone du barrage de Manantali, Mali. P. 29-44 ISBN 1278-3986 ISSN 1278-3986:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.1938L/abstract>

Mahamadou Y., Saley M. M., Fodé M. 2018. Analyse multimodèle régional de climat des précipitations et de température au Niger. *Météorologie*-n°101, 12P.

Mbaye M. L. ,2015 : évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin du Sénégal à Bakel. Thèse de doctorat, University of Abomey – Calavi ,136 pages.

Mbaye, M. L., Haensler, A., Hagemann, S., Gaye, A. T., Moseley, C. and Afouda, A., 2015b: Impact of statistical bias correction on the projected climate change signals of the regional climate model REMO over the Senegal River Basin. *Int. J. Climatol.*doi: 10.1002/joc.4478.

<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.4478>

Mbaye, M.L., Sy, K., Faty, B., & Sall, S.M., 2020 : Impact du réchauffement climatique de 1,5 et 2,0°C sur l'hydrologie du bassin versant de la Faleme. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100719. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100719>.

Nam W. H., Hayes M., Wilhite D., et Svoboda M., « Projection of Temporal Trends on Drought Characteristics using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in South Korea », *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, vol. 57, p. 37-45, janv. 2015, doi: 10.5389/KSAE.2015.57.1.037.

Noblet M., Faye A., Camara I., Seck A., Sadio M., Bah A., 2018. Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière. *Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne*". Climate Analytics GmbH, Berlin, 76 pages.

Nonguierma A, Niang A, (2006) : Étude cartographique de la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal. Identification des besoins cartographiques et élaboration des TDR pour la cartographie et l'interprétation, 85 pages.

Orange D, (1992) : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Sciences Géologiques*, Mém. n°93. U.L.P., C.N.R.S., ORSTOM. 198 pages.

O. Vannier et I. Braud, « Calcul d'une évapotranspiration de référence spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France », p. 24, 2012.

Perrin C., Claude M., Vazken A., 2007. Modèles hydrologiques du génie rural (GR), Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16p.

Pierre B., 2010 : Modélisation hydrologique en contexte de changement climatique : Incertitudes liées aux paramètres de modèles conceptuels pluie-débit. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, mémoire de Master, 49 pages.

Puget J L., Blanchet R., Salençon J., Carpentier A., Chapron J Y., 2010. Le changement climatique ; Institut de France - L'académie des sciences, 26 octobre 2010 ; 21p.

Rameshwaran, P., Bell, VA, Davies, HN et Kay, AL (2021). Comment le changement climatique pourrait-il affecter les débits fluviaux à travers l'Afrique de l'Ouest ? *Changement climatique*, 169 (3), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03256-0>.

Roussette C., 1974 : Monographie Hydrologique du fleuve Sénégal. Coll. Mem. ORSTOM, 14-42 p.

Sané B., Cisse A., Faye C., Sane T., 2020 : L'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 A 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la BASSE CASAMANCE». *Espace Géographique et Société Marocaine*, (32).

Sambou S., Sane M. L., Leye I., Ndione D. M, S. Kane S., et Badji M. L., « Calage et validation de SWAT sur le bassin versant du Bafing (Fleuve Sénégal) en amont de BAFING MAKANA : vers une application à la gestion du barrage de Manantali », in *Proceedings of IAHS*, nov. 2021, vol. 384, p. 363-366. doi: 10.5194/piahs-384-363-2021.

Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., (1999): De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 12, n° 2, pp. 363-387.

Sighomnou D, (2004) : Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Yaoundé1, département des Sciences de la Terre, 291 pages.

Tapsoba D, (1997) : Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest africains et de leur récent changement. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-XI (Orsay), 142 pages.

Traore V.B., Sambou S., Tamba S., Fall S., 2014 : Etalonnage du modèle pluie-ruissellement GR4J et GR2M sur le bassin du Koulountou, un affluent du fleuve Gambie.

[doi :10.11648/j.ajep.20140301.15](https://doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15)

Vischel, T., Lebel, T., Panthou, G., Quantin, G., Rossi, A., & Martinet, M. (2015). Le retour d'une période humide au Sahel?: observations et perspectives.

Yang, M., Yan, D., Yu, Y., & Yang, Z. (2016). SPEI-based spatiotemporal analysis of drought in Haihe River Basin from 1961 to 2010. *Advances in Meteorology*, 2016.