



UNIVERSITE JOSEPH KI-ZERBO
INSTITUT DU GENIE DE
L'ENVIRONNEMENT ET DU
DEVELOPPEMENT DURABLE



MÉMOIRE

pour l'obtention du

Diplôme de Licence Professionnelle en Génie de l'Environnement

Option : Technologie de l'Eau et de l'Assainissement (TEA)

Présenté par : **Arsène Wend-denda KIEMA**

ÉVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DU BASSIN DU MOUHOUN À NOWKUY (BURKINA FASO)

Soutenu le mardi 26 Juillet 2022

Sous la supervision :
Dr ZOURE Cheick Oumar

Membres du jury :
Président : Dr Sié Zacharie KAM
Directeur de mémoire : Dr Cheick Oumar ZOURE
Rapporteur : Dr Augustin ZONGO

Année Académique : 2020-2021

Table des matières

Table des matières	I
Remerciements	III
Table des figures	IV
Liste des tableaux	V
Résumé	VII
Abstract	VIII
0.1 Contexte et Justification	1
0.2 Problématique	2
0.3 Objectifs	2
0.4 Plan	2
1 Généralités	3
1.1 Présentation de la structure d'accueil	3
1.2 Synthèse de quelques travaux	4
2 Zone d'étude et Matériel	5
2.1 Zone d'étude	5
2.1.1 Situation géographique	5
2.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique	5
2.1.3 Contexte climatique	6
2.1.4 Contexte hydrologique	7
2.2 Données et Outils	7
2.2.1 Données	7
2.2.2 Outils	8
3 Methodes	9
3.1 Identification des projections climatiques de référence	9
3.2 Etude du changement climatique	10
3.2.1 Choix des périodes	10
3.2.2 Evaluation des modifications climatiques sur la période d'étude	11
3.2.3 Désagrégation des modifications climatiques	11
3.3 Ajustement des modèles hydrologiques : GR4J et SWAT	12

3.3.1	Etude de sensibilité	12
3.3.2	Calibration	12
3.3.3	Validation	12
3.4	Impact des changements climatiques sur la ressource en eau	13
3.4.1	Elaboration des scénarios hydrologiques	13
3.4.2	Evaluation des modifications hydrologiques	13
3.4.3	Etude de sensibilité des modifications hydrologiques	13
4	Resultats	14
4.1	Identification des projections climatiques de référence	14
4.2	Etude du changement climatique	15
4.2.1	Evaluation des modifications des variables climatiques par rapport à la période de référence	15
4.2.2	Désagrégation des modifications climatiques	16
4.3	Ajustement des modèles hydrologiques : GR4J et SWAT	19
4.3.1	Etude de sensibilité	19
4.3.2	Calibration et validation	19
4.4	Impact des changements climatiques sur la ressource en eau	20
4.4.1	Elaboration des scénarios hydrologiques	20
4.4.2	Evaluation des modifications hydrologiques	21
4.4.3	Etude de sensibilité de ces différentes modifications	23
5	Discussion	29
	Conclusion	32
	Bibliographie	33
	Annexes	i
	Annexe i : Modèles climatiques utilisés	ii
	Annexe ii : Analyse de stationnarité des les variables climatiques	iii
	Annexe iv : Stationnarité des variables hydrologiques	iv
	Annexe v : Modifications hydrologiques	iv

Remerciements

Au terme de travail de fin de cycle, nous voudrions adresser nos remerciements à tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre à sa réussite. Nos remerciements vont à l'endroit des membres de l'administration de l'Institut du Génie de l'Environnement et du Développement Durable (IGEDD) pour n'avoir ménager aucun effort pour l'aboutissement de notre formation. De façon précise, nous remercions :

- Monsieur le Président de l'Université Joseph KI-ZERBO, Pr Rabiou CISSE, pour avoir permis le déroulement de notre formation et facilité notre séjour ;
- Monsieur le Président de l'Institut du Génie de l'Environnement et du Développement Durable (IGEDD), Pr Bila Gerard SEGDA de nous avoir accepté au sein de son institut
- Monsieur le Chef de Département de la filière Technologie de l'Eau et de l'Assainissement (TEA), Dr, Maurice OUEDRAOGO, pour les multiples efforts consentis pour la bonne exécution du programme de formation ;
- Le Corps professoral interne et externe à l'IGEDD pour avoir bien voulu partager leur connaissance et nous orienter dans nos objectifs de formation.

Par ailleurs, nous formulons nos remerciements à Madame la Directrice Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Centre-Nord (DREA-CNR), Clarisse Emma OUEDRAOGO/YAMEOGO pour avoir bien voulu nous accorder ce stage de trois pour la réalisation de notre mémoire.

Nous tenons également à remercier vivement Dr Cheick Oumar ZOURE, qui en dépit de ses multiples obligations professionnelles, a bien voulu accepter nous encadrer. Par la pertinence de ses réflexions et suggestions, ses qualités humaines, son professionnalisme ainsi que son pragmatisme, a activement contribué à la révision critique de ce document. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Aussi, nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur Sié Fadel OUATTARA, qui nous a accompagné tout au long de notre stage à la DREA-CNR.

Nous faisons une mention spéciale aux camarades étudiants de l'IGEDD et spécifiquement à ceux de la promotion 2020-2021 de la filière TEA et GPAT, pour ces unes années de franche collaboration et apprentissage passés ensemble.

Table des figures

1.1	Organigramme de la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Centre-Nord	4
2.1	Situation géographique du bassin hydrographique du Mouhoun à Nowkuy	6
2.2	Distribution spatiale des variables climatiques (Période : 1981-2010)	7
4.1	Evaluation des performances des modèles climatiques sur les données de précipitation (1981-2005)	14
4.2	Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier de la pluviométrie	16
4.3	Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier des pertes par évapotranspiration .	16
4.4	Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier de la température	17
4.5	Evolution temporelle de la précipitation (2011-2040)	18
4.6	Evolution temporelle de l'évapotranspiration (2011-2040)	19
4.7	Evolution temporelle de la température (2011-2040)	20
4.8	Sensibilité des paramètres du modèle SWAT	21
4.9	Comparaison entres les hydrogrammes observé et simulé	22
4.10	Comparaison entre l'hydrogramme de référence et projeté	23
4.11	Evolution temporelle des modules observés et simulés	24
4.12	Evolution temporelle des débits moyens annuels simulés (2011-2040)	25
4.13	Courbe d'évolution temporelle des débits minimums annuels (2011-2040)	26
4.14	Courbe d'évolution temporelle des débits maximums annuels (2011-2040)	27
4.15	Distribution temporelle des indices standardisés de débit	27
4.16	Comparaison du régime pluviométrique et hydrologique	28
1	Analyse de stationnarité des données pluviométriques moyennant le test de PETTITT	iii
2	Analyse de stationnarité des données d'évapotranspiration par le test de PETTITT	iii
3	Analyse de stationnarité des températures moyen du test de PETTITT	iv
4	Analyse de stationnarité des données pluviométriques moyennant le test de PETTITT	v
5	Analyse de stationnarité des débits minimums annuels au moyen du test de PETTITT	v
6	Analyse de stationnarité des débits maximums annuels au moyen du test de PETTITT	vi
7	Analyse comparative des distributions des débits moyens annuels observés (1981-2010) et pro- jetés (2011-2040)	vi
8	Analyse comparative des distributions des débits minimums annuels observés (1981-2010) et projetés (2011-2040)	vii
9	Analyse comparative des distributions des débits maximums annuels observés (1981-2010) et projetés (2011-2040)	viii

Liste des tableaux

2.1	Paramètres morphométriques du bassin hydrographique du Mouhoun à Nwokuy	5
3.1	Critères de performances du diagramme de Taylor	10
3.2	Critère de performance	12
4.1	Performances des modèles climatiques	15
4.2	Etude de stationnarité, moyenant les tests de PETTITT et de Man Kendall	17
4.3	Caractéristiques des ruptures	18
4.4	Performances des modèles hydrologiques	21
4.5	Scénarios hydrologiques	21
4.6	Résumé statistiques des débits moyens annuels	23
4.7	Résultats de l'analyse de la stationnarité des modules, à partir du test de PETTITT	25
4.8	Résultats de l'analyse de la stationnarité des débits minimum annuels, à partir du test de PETTITT	26
4.9	Caractéristique de la rupture des débits minimums annuels (SH-SWAT-RCP4.5)	26
4.10	Résultats de l'analyse de la stationnarité des débits maximum annuels, à partir du test de PETTITT	28
1	Modèles climatiques inventoriés	ii

Sigles et abréviation

CC	: Changement Climatique
CDT	: Climate Data Tools
CHIRPS	: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CMIP5	: Coupled Model Intercomparison Project 5
EQM	: Empirical Qantil Mapping
ETP	: Evapotranspiration
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GR4J	: Génie rural à quatre paramètres journaliers
JRA-55	: Japanese 55-year Reanalysis
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
ODD	: Objectif de Développement Durable
OMD	: Objectif du Millénaire pour le Développement
PCP	: Précipitation
RCP	: Representative Concentration Pathways
RE	: Ressource en Eau
SWAT	: Soil and Water Assessment Tools
Tmax	: Température maximale
Tmin	: Température Minimale

Résumé

La présente étude a été mise en œuvre sur le bassin hydrographique du Mouhoun à Nowkuy. Elle a eu pour but de mettre en évidence les changements climatiques d'une part et d'autre part d'apprécier la dynamique temporelle des écoulements du fleuve Mouhoun à la station de jaugeage de Nowkuy (Dédougou) au cours de la période 2011-2040. Ainsi, quatre variables climatiques ont été analysées afin de déceler les modifications éventuelles du régime climatique. Il s'agit notamment de la **précipitation**, l'**évapotranspiration**, la **température maximale** et **minimale**. Ces données proviennent des simulations du modèle [CCCma-CanESM2](#) qui fait partie du projet CMIP5. Les résultats de l'analyse climatique montrent une modification du régime pluviométrique sur la période 2011-2040. Cette modification se caractérise principalement par l'apparition d'un pic de précipitation au mois de mai, selon les deux scénarios climatiques ([RCP 4.5](#) et [RCP 8.5](#)). Qui plus est, il est attendu une augmentation des températures minimales, particulièrement au cours des mois de juin à septembre. Toutefois, d'après le test de Man Kendall, l'évolution temporelle de l'évapotranspiration et des températures sur la période 2011-2040 est à la hausse et significative au seuil de 5%. Quant à la précipitation, la tendance n'est pas significative à ce seuil, malgré que la courbe de tendance laisse entrevoir une évolution à la hausse. En vertu des résultats du test de PETTITT, il est attendu une rupture des séries chronologiques d'évapotranspiration et de températures. Ces ruptures, qui se caractérisent toutes par une hausse sont localisées en 2020, 2023 et 2025 respectivement pour l'évapotranspiration, la température maximale et minimale. L'impact de ces modifications sur la ressource en eau est évalué moyennant les modèles hydrologiques [SWAT](#) et [GR4J](#), préalablement ajustés. L'intégration des scénarios climatiques ([RCP 4.5](#) et [RCP 8.5](#)) dans les modèles hydrologiques a abouti à l'élaboration de quatre scénarios hydrologiques. L'examen graphique des courbes de tendance révèle une tendance à la hausse des modules, des débits maximums et minimums. Cependant, au seuil de 5%, le test de Man Kendall précise que seule la tendance des débits minimums est significative. Quant au test de PETTITT, il indique une rupture à la hausse de la série des débits minimums (élaborés avec le scénario climatique [RCP4.5](#) et [SWAT](#)), en 2029. Selon le modèle [GR4J](#), les écoulements connaîtront une augmentation d'environ +23% si les changements climatiques suivent le scénario pessimiste [RCP 8.5](#) et +22% si toutefois c'est le scénario [RCP 4.5](#) qui est observé. Quant au modèle [SWAT](#), c'est une augmentation de +4% qui est prévue pour le scénario [RCP 8.5](#) et +2% pour le scénario [RCP 4.5](#).

Mots clés : [Changement climatique](#); [Modélisation hydrologique](#); [SWAT](#); [GR4J](#); [Nowkuy](#).

Abstract

In this study, it was a question of highlighting the manifestations of climate change at the scale of the Mouhoun basin in Nowkuy, first and secondly to assess the potential impacts on resources. For this, four climatic variables were identified on the basis of their relevance in the hydrological cycle, then analyzed. These include **precipitation, evapotranspiration, maximum and minimum temperature**. These data were obtained from simulations of the [CCCma-CanESM2](#) model, which is part of the CMIP5 project. The results of the climate analysis show a change in the rainfall regime during 2011-2040. This change is mainly characterized by the appearance of a precipitation peak in May, according to the two climate scenarios ([RCP 4.5](#) and [RCP 8.5](#)). In addition, an increase in minimum temperatures is expected, particularly during the months of June to September. However, according to the Man Kendall test, the temporal evolution of evapotranspiration and temperatures over the period 2011-2040 is upward and significant at the 5% threshold. As for precipitation, the trend is not significant at this threshold, despite the fact that the trend curve suggests an increasing trend. According to the results of the PETTITT test, a break in the evapotranspiration and temperature time series is expected. These breaks, which are all characterized by an increase, are located in 2020, 2023 and 2025 for evapotranspiration, maximum and minimum temperature respectively. The impacts of these changes on the water resource are evaluated by means of the [SWAT](#) and [GR4J](#) hydrological models, which were previously adjusted. The integration of climate scenarios ([RCP 4.5](#) and [RCP 8.5](#)) resulted in the development of four hydrological scenarios. Graphical examination of the trend curves reveals an increasing trend in modulus, maximum and minimum flows. However, at the 5% threshold, the Man Kendall test indicates that only the minimum flow trend is significant. As for the PETTITT test, it indicates an upward break in the minimum flow series (developed with the [RCP 4.5](#) climate scenarios and [SWAT](#) model), in 2029. According to the [GR4J](#) model, flows will increase by about +23% if climate change follows the pessimistic [RCP 8.5](#) scenario and +22% if the [RCP 4.5](#) scenario is observed. As for the [SWAT](#) model, an increase of +4% is predicted for the [RCP 8.5](#) scenario and +2% for the [RCP 4.5](#) scenario.

Key words: [Climate change](#); [Hydrological modeling](#); [SWAT](#); [GR4J](#); [Nowkuy](#).

Introduction

0.1 Contexte et Justification

Le changement climatique est l'un des problèmes majeurs du 21^e siècle, du fait de ses effets négatifs sur plusieurs secteurs clés de l'économie et l'écosystème planétaire (Mouhamed et al., 2019). Depuis plusieurs décennies, le continent africain fait face à une crise climatique de plus en plus sévère. La plupart des études scientifiques réalisées sur ce continent atteste une diminution des cumuls pluviométriques annuels à partir de la décennie 1970 (Mahé et al., 2005; Fulgence Tiessouma et al., 2013; Lejeune and SAEED, 2019). Cette récession pluviométrique s'accompagne également d'une augmentation de l'évapotranspiration du fait de la hausse des températures. A cela s'ajoute la recrudescence des extrêmes hydrométéorologiques tels que les inondations et les sécheresses. Du fait des moyens de résilience précaire, les pays de l'Afrique en particulier ceux de la région subsaharienne sont classés parmi les pays les plus vulnérables aux effets de la variabilité et du changement climatique. Les sécheresses des années 1970 et 1980 (Nicholson and Flohn, 1980; Nicholson, 1981; Sircoulon, 1986; Paturel et al., 1998; Mahé et al., 2005) attestent bien la vulnérabilité de ces pays à la variabilité et au changement climatique. Cet état de fait a amené certains chercheurs à porter un regard particulier sur ce phénomène qui prend de plus en plus de l'ampleur. Les études réalisées par Ndiaye (2003), Mahé et al. (2005), Kiema (2019) ont mis en exergue l'effet de la variabilité, du changement climatique ainsi que des activités anthropiques sur les ressources en eau, dans le bassin hydrographique du Mouhoun. Au regard des enjeux liés aux changements climatiques et aussi de l'importance cruciale des ressources en eau dans le développement socioéconomique, le Burkina Faso s'est inscrit depuis les années 90 dans un processus de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Cet outil de gestion (la GIRE) consacre le bassin versant comme cadre approprié de planification et de gestion (Fulgence Tiessouma et al., 2013), impliquant ainsi des études à l'échelle de cet espace. En outre, depuis 2015 le Burkina Faso s'est résolument engagé dans l'élaboration d'un Plan National d'Adaptation afin d'anticiper les effets néfastes du changement climatique (Lejeune and SAEED, 2019). En toute connaissance de cause, un tel plan doit avoir pour encre des connaissances fiables qui permettent de comprendre comment le climat va évoluer au cours des années à venir et quel en sera l'impact potentiel sur les ressources en eau. Il s'avère aussi important de s'inscrire dans une dynamique d'actualisation continue des connaissances, afin de rester en phase avec la réalité. De la revue de la littérature, il en ressort que la modélisation hydrologique est un outil approprié pour l'étude de l'impact du climat sur la ressource en eau. Ainsi, la présente étude se propose d'étudier l'évolution de la ressource en eau dans le contexte du changement climatique, moyennant les modèles SWAT et GR4J, amplement utilisés.

0.2 Problématique

Des études sur le climat révèlent que les changements climatiques à venir vont se traduire par une modification spatiale et temporelle des températures et régimes de précipitation au Burkina Faso ([Sylla et al. \(2016\)](#) cité par [Lejeune and SAEED \(2019\)](#)). Toute chose qui risque d'exacerber la problématique de la ressource en eau et par conséquent compromettre les Objectifs de Développement Durable (ODD), qui consacre à son article 6 un accès universel à l'eau et une gestion durable des ressources en eau ([ONU, 2018](#)). Anticiper les impacts du changement climatique sur les ressources en eau s'avère donc nécessaire pour proposer des stratégies d'adaptation.

0.3 Objectifs

L'objectif de cette étude est de **mettre en évidence les manifestations du changement climatique sur la période 2011-2040, et évaluer l'impact potentiel sur les ressources en eau, dans le bassin du Mouhoun à Nowkuy**. Plus spécifiquement il s'agit de :

- ✚ Comprendre l'évolution future du climat sous deux scénarios d'émission (RCP 4.5 et 8.5);
- ✚ Modéliser le comportement hydrologique du bassin du Mouhoun à travers les modèles SWAT (version 2012) et GR4J;
- ✚ Evaluer l'impact du climat futur sur les ressources en eau.

0.4 Plan

Le présent document qui fait la synthèse de nos travaux est structuré en cinq (5) chapitres.

- 📖 Le premier chapitre traite des généralités sur la thématique abordée;
- 📖 Le deuxième et troisième chapitre sont consacrés respectivement à la présentation du matériel utilisé et de la méthodologie déployée;
- 📖 Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des résultats;
- 📖 Le dernier chapitre est réservé à la discussion des résultats.

Généralités

1.1 Présentation de la structure d'accueil

La Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Centre-Nord (DREA-CNR) est la structure au sein de laquelle nous avons effectué notre stage et précisément au Service Ressource en Eau et Infrastructure Hydraulique. Cette structure tire son existence des dispositions du décret [n°2016-342/PRES/PM/MEA du 04 mai 2016](#) portant organisation du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA). Il s'agit en fait d'une structure déconcentrée placée sous la tutelle administrative du Secrétariat Général dudit ministère. Par suite, l'arrêté 2016-137/MEA du 29 décembre 2016 portant organisation et attribution précise les attributions de ladite structure. La DREA-CNR a pour mission fondamentale de contribuer à la conception, l'élaboration, le contrôle et le suivi-évaluation de la mise en œuvre des politiques et stratégies du département dans son ressort territorial, la région du centre-nord. Pour ce faire, elle est chargée de :

- Veiller au respect de la législation et de la réglementation dans le domaine de l'eau et de l'assainissement ;
- Coordonner et assurer le suivi de la mise en œuvre au niveau régional, des activités de toutes les structures du ministère ;
- Suivre la mise en œuvre des projets et programmes du département et en faire des comptes périodiques au niveau central ;
- Suivre et s'assurer de la bonne exploitation des infrastructures et ouvrages hydrauliques ;
- Assurer l'appui-conseil des représentants de l'Etat, les collectivités territoriales, des services techniques déconcentrés de l'Etat, des Organisations de la société civile dans la coordination ;
- Assurer l'assistance technique à la maîtrise d'ouvrage communale en matière d'eau potable et d'assainissement ;
- Assurer toutes autres missions assignées par la hiérarchie.

L'organigramme ci-dessous (1.1) présente l'organisation de la DREA-CNR

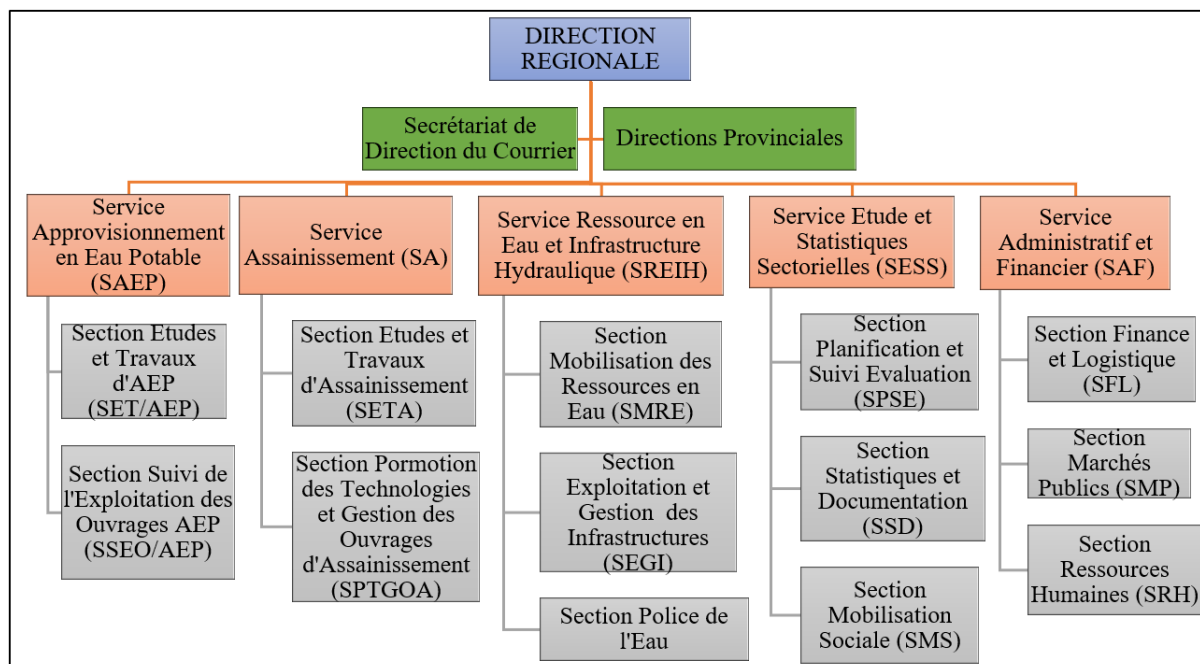


FIGURE 1.1 : Organigramme de la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Centre-Nord

1.2 Synthèse de quelques travaux

Le bassin hydrographique du Mouhoun a fait l'objet de plusieurs études scientifiques (thèse doctorale, master, licence, article scientifique, etc.). Et cela, du fait de son importance capitale pour l'économie nationale. En effet, en terme de superficie, de pérennité, d'importance de débit, de population, le bassin du Mouhoun est classé au premier rang des bassins nationaux du Burkina Faso (DGRE, 2018). Les études réalisées par Ndiaye (2003), Mahé et al. (2005), DGRE (2018) et Kiema (2019) sur le régime hydroclimatique ont mis en exergue l'impact du climat et des aménagements hydro-agricole sur le régime des écoulements. Mahé et al. (2005) ont montré que les écoulements dans les cours d'eau sahéliens en particulier au Burkina Faso et au Niger ont connu une hausse allant de 35% à 108%, malgré une péjoration des conditions climatiques. Cette situation, baptisée sous le nom de paradoxe sahélien s'explique par une destruction des états de surface qui aurait entraîné une augmentation de l'aptitude des sols à l'écoulement. Il en résulte donc que les états de surface jouent un rôle primordial dans le processus des écoulements, comme le soulignent plusieurs auteurs (Sighomnou, 2004; Lienou, 2007; Yonaba, 2020). Les résultats des travaux conduits par (Kiema, 2019) ont révélé effectivement une hausse très significative de 97.26% des écoulements à la station de Nowkuy. Par ailleurs, les résultats montrent un changement considérable du régime hydrologique (décalage d'un mois du début des écoulements, retard de quinze (15) jours de la montée des eaux, atteinte précoce du débit de pointe, etc.). En outres les études réalisées dans le cadre de la mise en œuvre du Plan National d'Adaptation au changement climatique (Lejeune and SAEED, 2019; Zougmore et al., 2019) ont mis en lumière la sensibilité des ressources en eau aux scénarios climatiques. Les résultats de quatre (4) modèles hydrologiques indiquent un risque non négligeable de diminution des taux de ruissellement et de recharge des aquifères sur au moins la moitié sud-ouest du Burkina Faso durant la seconde moitié du XXI^{me} siècle selon le RCP6.0.

Zone d'étude et Matériel

2.1 Zone d'étude

2.1.1 Situation géographique

Le bassin hydrographique du Mouhoun à Nwokuy est situé dans la partie sud-ouest du Burkina Faso et précisément dans le Mouhoun supérieur entre les latitudes de 10°46' et 12°32' N et les longitudes 5°21' et 3°24' W ([FIGURE 2.1](#)). La station hydrométrique de Nowkuy qui constitue l'exutoire principal du bassin est située à 3°33' de longitude ouest et 12°31' de latitude nord. Le bassin couvre deux régions que sont la région des Hauts-Bassins et la région de la Boucle du Mouhoun. La grande portion du bassin se trouve sur la région des Hauts-Bassins. C'est un bassin fortement dominé par les activités anthropiques. Le [TABLEAU 3.2](#) ci-dessous est un résumé de quelques caractéristiques morphologiques du bassin.

TABLE 2.1 : Paramètres morphométriques du bassin hydrographique du Mouhoun à Nwokuy

PARAMETRE	VALEUR
Superficie	14 900 Km2
Périmètre	808 Km
Longueur du rectangle équivalent	363,26 Km
Indice de compacité de Gravelius Kg	1.86
Pente moyenne	0,54 m/Km

2.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Sur le plan géologique, le bassin hydrographique du Mouhoun à Nwokuy est caractérisé par deux ensembles géologiques : le socle et le bassin sédimentaire. Le socle est constitué de roches très diverses allant de roches très acides (granites) à des roches très basiques (amphibolites, roches vertes, dolérites). Dans le socle, on distingue deux types d'aquifères :

- ❖ Les aquifères d'altération qui se distinguent par la nature du substratum, les roches acides étant les plus favorables

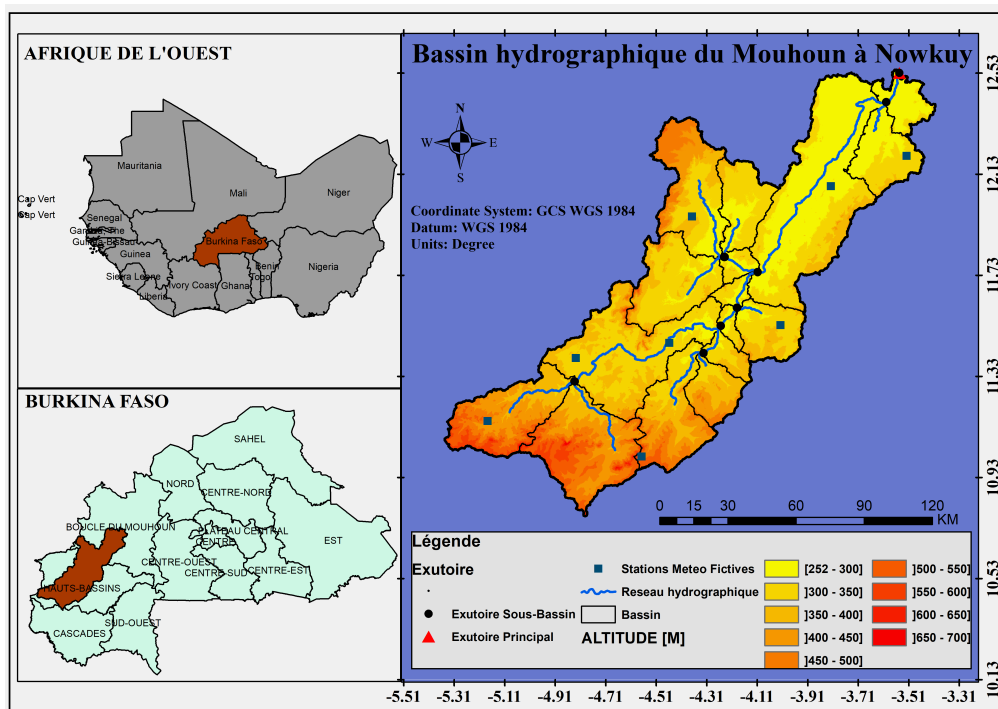


FIGURE 2.1 : Situation géographique du bassin hydrographique du Mouhoun à Nowkuy

- ❖ Les aquifères de fracturation qui se distinguent par le degré de fracturation qui détermine les potentialités de l'aquifère.

Le bassin sédimentaire est composé de couches à forte dominance gréseuse d'âge précambrien supérieur. De bas en haut, on distingue les grès inférieurs, les grès de base, les grès de Sotuba, les grès de galets de quartz, l'étage gréso-schisto-dolomitique et les grès roses.

2.1.3 Contexte climatique

Le bassin hydrographique du Mouhoun est subdivisé en deux zones climatiques. Du Nord au Sud, on rencontre la zone soudano-sahélienne et la zone soudanienne.

- ❖ Zone soudano-sahélienne : Elle occupe la plus grande partie du bassin. Elle s'étend du centre jusqu'au nord de la zone d'étude. La pluviométrie moyenne est comprise entre 600 et 900mm.
- ❖ Zone soudanienne : Elle occupe l'extrémité sud du bassin. Avec des pluies annuelles de plus de 900 mm, elle constitue la zone la mieux arrosée du Burkina Faso.

La pluviométrie est très inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Le gradient pluviométrique est croissant du Nord au Sud [FIGURE 2.2](#) et la quasi-totalité des pluies tombe pendant la période de juin à octobre (saison d'hivernage) et le reste de l'année est caractérisé par une longue saison sèche (novembre à mai). Tout comme la précipitation, les températures sont aussi distribuées de façon inégale dans l'espace et dans le temps, les plus fortes températures sont observées au cours du mois de janvier, février, mars et avril. Contrairement à la pluviométrie, le gradient thermique est décroissant du Nord au Sud.

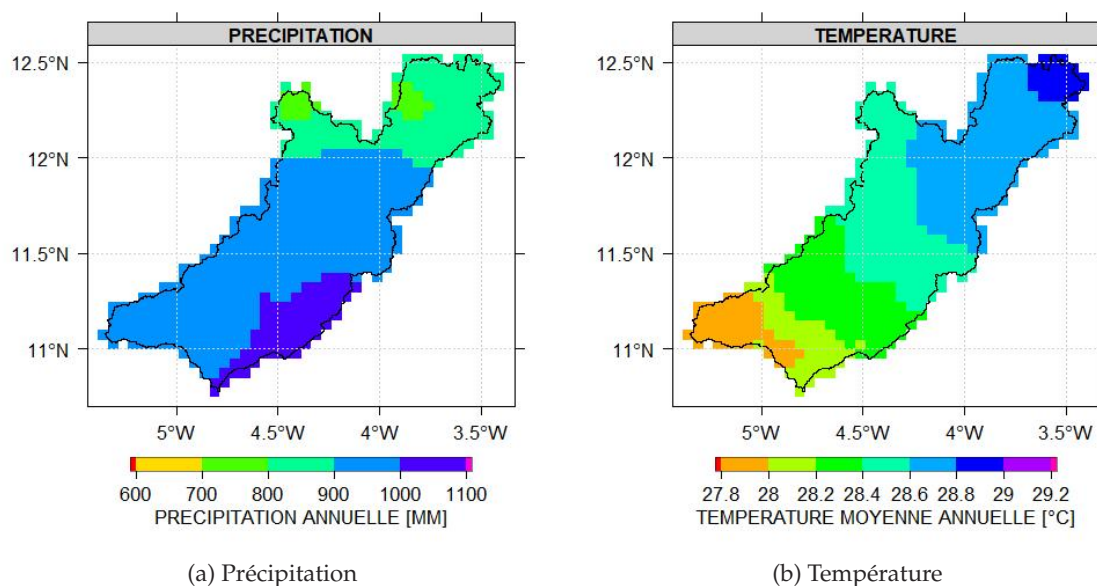


FIGURE 2.2 : Distribution spatiale des variables climatiques (Période : 1981-2010)

2.1.4 Contexte hydrologique

Le réseau hydrographique du Mouhoun à la station de Nwokuy est assez dense. Le Mouhoun est le cours d'eau principal, il prend sa source depuis les plateaux gréseux à l'ouest du Burkina Faso à environ 500 m d'altitude. Il constitue le cours d'eau le plus important du Burkina, en termes de pérennité, de débit et de longueur. Le débit moyen annuel du Mouhoun à Nwokuy est de l'ordre de $41 \text{ m}^3/\text{s}$. Le régime hydrologique est de type simple, c'est-à-dire une seule montée et une seule décrue. Les écoulements à la station de Nwokuy sont tributaires des précipitations, par conséquent la période de hautes eaux coïncide avec la saison d'hivernage.

2.2 Données et Outils

2.2.1 Données

a) Données hydroclimatique

- ❖ Données hydrologiques : Des débits journaliers observés de la station hydrométrique de Nowkuy, couvrant la période 1951 à 2019. Ces données seront utilisées pour la calibration et validation des modèles. Elles serviront également de données de référence pour l'évaluation des modifications hydrologiques sur la période d'étude.
- ❖ Données météorologiques : Il s'agit en fait de données mergées de précipitation et de température maximale et minimale. La fusion ou le merging a été réalisé avec les données estimées de CHIRPS et JRA55 ([Japan Meteorological Agency, Japan, 2013](#)) respectivement pour la précipitation et la température. Elles sont au pas de temps journalier et couvrent la période 1961-2018 pour la température et 1981-2017 pour la précipitation. Elles sont utilisées dans un premier temps pour

l'identification des produits climatiques de référence puis dans un second temps pour l'évaluation des modifications climatiques.

- ❖ Un modèle numérique de terrain de résolution 90 m il est téléchargé sur le site d' [HydroSHEDS](#). Le MNT est utilisé à l'intérieur du modèle SWAT pour la caractérisation du bassin.
- ❖ Une couche de type de sol et d'utilisation des terres. Elles sont téléchargées sur le site de [SWAT](#). Ces données sont utilisées par le modèle pour la définition des unités de réponse hydrologique.
- ❖ Une base de données SWAT (fichier swat2012.mdb) contenant des tables de sol et d'occupation des terres modifiées.

b) Projections climatiques

Les modèles climatiques utilisés dans cette étude sont un extrait des modèles de la phase 5 du projet d'intercomparaison des modèles couplés ([Meehl et al., 2000](#)). Les différents modèles CMIP5 utilisés pour les projections sont tous considérés comme donnant des projections également probables au sens de « un modèle, une voix ». C'est au total dix modèles dudit projet qui ont été considérés dans cette étude ([Annexe i](#)). La résolution spatiale est la même pour tous les modèles ($1^\circ \times 1^\circ$). Chaque modèle est constitué de deux (2) scénarios d'émission, un scénario optimiste (4.5 W/m^2) (RCP4.5) et un scénario pessimiste (8.5 w/m^2) (RCP8.5) et porte sur la précipitation, la température maximale et minimale. Les projections sont au pas de temps journalier et couvrent la période 1951-2100.

2.2.2 Outils

Les outils qui ont servi à la réalisation de la présente étude sont principalement :

- ☑ [ArcSWAT](#) : Il s'agit d'une extension d'ArcGis, conçue pour faciliter la préparation des données d'entrée et l'exécution du modèle SWAT. Il a servi à l'élaboration du projet SWAT.
- ☑ [Le logiciel R version 4.0.2 \(2020-06-22\) 64 bits](#) : C'est à la fois un logiciel et un environnement de programmation orientée objet. Il a été utilisé principalement pour l'extraction des données climatiques, le traitement et l'analyse statistiques des données, la mise en œuvre des modèles hydrologiques (SWAT et GR4J), la production des graphiques.
- ☑ [L'outil Climate Data Tools \(CDT\) version 6.5](#) : Il s'agit d'un package R avec interface graphique, développé par l'Institut International de Recherche (IRI) pour faciliter le traitement, l'analyse et la visualisation des jeux de données climatiques. Il a été utilisé pour le contrôle de qualité, la correction de biais et le calcul des données d'évapotranspiration potentielle.
- ☑ [L^AT_EX](#) : Pour la rédaction du document.

Methodes

La méthodologie utilisée dans cette étude se scinde en quatre (4) grandes parties :

- ✓ Identification des projections climatiques de référence ;
- ✓ Etude du changement climatique ;
- ✓ Ajuste des modèles hydrologiques ;
- ✓ Impact du changement climatique sur la ressource en eau.

3.1 Identification des projections climatiques de référence

L’identification d’un modèle climatique de référence est un processus assez complexe qui fait intervenir plusieurs étapes. La première étape a consisté en la mise place d’une base de données climatiques provenant de dix (10) modèles du projet CMIP5.

La deuxième étape concerne le traitement des données. Cette étape est constituée du contrôle de qualité et de la correction de biais avec la méthode quantile-quantile. C’est une méthode très rependue et connue pour son efficacité à la correction de la distribution interne des données. Les résultats de plusieurs études ([Lebel et al., 1996](#); [Cassou and Guilyardi, 2007](#); [Minoungou, 2020](#); [Nebié, 2020](#); [Tabsoba, 2020](#)) attestent l’efficacité de la méthode à la correction des données climatiques, particulièrement les données pluviométriques journalières qui se caractérisent par une forte variabilité temporelle et spatiale.

Enfin la troisième étape qui porte sur l’évaluation et la comparaison des modèles, moyennant le diagramme de Taylor, il s’agit en fait d’un cadre graphique utilisant trois critères de performance pour évaluer les données ([TABLEAU 3.1](#)). L’une des difficultés fréquemment rencontrées lors de l’évaluation des modèles est la divergence des performances suivant les variables. En effet, il peut arriver que les performances des modèles évoluent en fonction des variables, dans ce cas de figure le choix est beaucoup plus délicat si l’on doit considérer l’ensemble des variables. Puisque le meilleur modèle est celui qui présente de bons scores pour toutes les variables, prises individuellement. Pour pallier cette difficulté, nous avons choisi de ne considérer qu’une seule variable pour l’évaluation des modèles, la précipitation. Ce choix se justifie par le fait que la divergence des modèles est généralement constatée avec la précipitation. Par ailleurs, la plupart des modèles arrivent à bien

simuler la température (Mouhamed et al., 2019). Qu'à cela ne tienne, la qualité des données de températures peut être rehaussée plus facilement à travers une correction de biais.

TABLE 3.1 : Critères de performances du diagramme de Taylor

Indicateur statistique	Formule	Plage de valeur	Meilleure score
Coefficient de corrélation de Pearson	$R^2 = \frac{\sum_t (Q_{Sim}^t - \overline{Q_{Sim}^t})(Q_{Obs}^t - \overline{Q_{Obs}^t})}{\sqrt{(\sum_t (Q_{Sim}^t - \overline{Q_{Sim}^t})^2) \sqrt{(\sum_t (Q_{Obs}^t - \overline{Q_{Obs}^t})^2)}}$	-1 à 1	1
RMSE	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(M_i - S_i)^2}{N}}$	$0 + \infty$	0
Ecart type	$ET = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \overline{X})^2}{N}}$	$0 + \infty$	Ecart-Type des données de référence

M_i et S_i sont respectivement les débits observés et simulés au jour i ;

\overline{M} et \overline{S} sont respectivement les débits moyens observés et moyens simulés sur la période considérée;

X_i et \overline{X} sont respectivement les débits (simulés non corrigés, corrigés ou observés) au jour i et le débit moyen (simulé non corrigé, simulé corrigé ou observé);

R^2 = coefficient de corrélation de Pearson

$RMSE$ = Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)

ET = Ecart type.

3.2 Etude du changement climatique

3.2.1 Choix des périodes

Afin d'évaluer les modifications futures du climat, il est important de se fixer une période de référence. La période de référence choisie pour cette étude est la normale climatique de référence, c'est-à-dire 1981-2010, soit trente (30) années d'observation. Il convient cependant de préciser que ce choix est guidé par la disponibilité des données. Quant à la période d'étude proprement dite, elle concerne la période de trente (30) années consécutives à la période de référence, donc 2011-2040. Le choix de cette période se justifie par le fait que pour avoir des résultats statistiquement significatifs il est impératif de considérer une série d'au moins trente (30) années d'observation. Par ailleurs, compte tenu du fait que notre étude n'intègre pas de scénarios d'occupation des terres, il serait moins pertinent de considérer une période très longue, quand t-on sait que les changements dans l'utilisation des terres pourrait remettre en cause les résultats de l'étude.

3.2.2 Evaluation des modifications climatiques sur la période d'étude

Pour évaluer les modifications éventuelles des variables climatiques on s'est appuyé sur des analyses purement graphiques. Il a été question d'établir une comparaison graphique de la saisonnalité des variables sur la période de références et sur la période d'étude (2011-2040). L'analyse des graphiques a fait ressortir les modifications probables du régime climatique.

3.2.3 Désagrégation des modifications climatiques

Pour mieux cerner les changements climatiques futurs à l'échelle du bassin du Mouhoun, il est nécessaire d'analyser l'évolution temporelle des variables caractéristiques de l'état moyen de l'atmosphère (précipitation, température, évapotranspiration). De la revue de la littérature, il en ressort deux types de non-stationnarité, les tendances et les ruptures. Une tendance correspond à un changement graduel des caractéristiques statistiques d'une série chronologique, contrairement à une rupture qui correspond à un changement brusque. Pour étudier ces tendances, deux méthodes ont été employées, méthode qualitative et quantitative. La méthode qualitative consiste en une analyse et interprétation de l'apparence visuelle des courbes d'évolution. En ce qui concerne la méthode dite quantitative, elle utilise des tests d'hypothèse (statistique inférentielle) pour vérifier la significativité des tendances et déceler des ruptures. Dans le cadre de ce travail, nous utilisons le test libre et non paramétrique de Mann Kendall pour la mise en évidence des tendances. Il s'agit là d'un test qui permet a priori de détecter des tendances non nécessairement linéaires dans la série. Ce test est basé sur la corrélation entre les rangs d'une série chronologique et leur ordre. L'hypothèse nulle, H_0 étant l'absence de tendance dans la série (Yue and Pilon, 2004). Le seuil de significativité α est fixé à 5% et sera considéré comme tel pour le test de PETTITT. Pour clore la partie, la stationnarité de la série chronologique est analysée en utilisant le test non paramétrique de PETTITT. Ce test est adapté à la détection d'un changement de moyenne dans une série chronologique. Il ne suppose aucune distribution particulière des données, il est dit libre. La statistique du test est calculée partir des signes des différences entre les valeurs qui forment l'échantillon. Une valeur de probabilité (p) est associée à la statistique du test. Cette valeur de probabilité est comparée au seuil de significativité α , (arbitrairement choisi) et permet de rejeter ou d'accepter l'hypothèse fondamentale. L'hypothèse nulle ou fondamentale (H_0) du test est la suivante : **il n'y a pas de rupture** (Rybski and Neumann, 2011). En cas de rupture, deux informations sont capitales, la date et l'amplitude de la rupture. La date de rupture est fournie par le test. L'amplitude quant à elle est calculée en utilisant la formule ci-dessous :

$$\tau = \left(\frac{M_2}{M_1} - 1 \right) * 100 \quad (3.1)$$

τ : Déficit associé à la rupture

M_2 : Moyenne après la rupture

M_1 : Moyenne avant la rupture

Lorsque le taux (τ) de variation est négatif, cela signifie que la rupture se traduit par une baisse par contre lorsqu'il est positif cela montre une augmentation de la variable étudiée.

3.3 Ajustement des modèles hydrologiques : GR4J et SWAT

3.3.1 Etude de sensibilité

L'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres du modèle qui ont une grande influence sur le processus des écoulements de surface, c'est-à-dire les débits à l'exutoire du bassin. Par ailleurs, elle permet de réduire le temps de calcul lors de la calibration. Cette étude a concerné uniquement le modèle SWAT qui possède un nombre élevé de paramètres (environ 180). Dans la littérature, on retrouve vingt-cinq (25) jeux de paramètre pour la composante hydrologique du modèle (confère Annexe iv). Ces paramètres ont donc servi de base pour l'étude de sensibilité qui a utilisé le test de sensibilité à l'amplitude de Fourier ([FAST](#)). Il s'agit en fait d'une méthode d'analyse de sensibilité globale basée sur la variance. La valeur de la sensibilité est définie sur la base de variances conditionnelles qui indiquent les effets individuels ou conjoints des entrées incertaines sur la sortie. FAST est plus efficace pour calculer les sensibilités que les autres méthodes d'analyse de la sensibilité globale basée sur la variance par intégration de Monte Carlo.

3.3.2 Calibration

La calibration est le processus par lequel on identifie les paramètres optimaux du modèle, c'est-à-dire, les paramètres qui permettent de décrire au mieux que possible la réponse hydrologique du bassin. L'objectif de la calibration est d'établir une concordance entre les débits simulés et ceux observés à l'exutoire du bassin. Les deux modèles hydrologiques ont été calibrés sur la période 2003-2008, soit six (06) années d'observation. Le routage des modèles a été effectué sur les deux premières années qui précèdent cette période. Les critères utilisés pour évaluer la performance du modèle sont le critère de [Nash and Sutcliffe \(1970\)](#), le R^2 et le pourcentage de biais. Les plages de valeurs acceptables pour ces différents critères sont consignées dans le [TABLEAU 3.2](#). Le critère de [Nash and Sutcliffe \(1970\)](#) est sans doute le critère le plus utilisé en modélisation hydrologique, il varie entre $-\infty$ et 1, le meilleur score étant 1. Toutefois, il convient de noter que dans la pratique, cette valeur optimale (1) ne peut être atteinte. C'est pourquoi des auteurs ([Arnold et al., 2012](#); [Moriasi et al., 2007](#)) ont proposé des valeurs seuilles pour valider les modèles. Lorsque $Nash \geq 0.5$, $R^2 \geq 0.5$ et PBIAIS compris entre ± 0.25 .

TABLE 3.2 : Critère de performance

Critère	Plage	Meilleur score
Nash	[0.5; 1]	1
Pbiais	[-25%; 25%]	0
R2	[0.5; 1]	1

3.3.3 Validation

L'étape de validation succède celle de la calibration. Comme son nom peut laisser penser, elle a pour objectif de valider les paramètres du modèle. Autrement, la validation vise à tester la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps, en évaluant les performances de celui-ci sur une période autre que celle de la calibration.

Techniquement, elle s'effectue en forçant le modèle avec les paramètres optimaux identifiés lors de l'étape de la calibration et en évaluant les performances en utilisant les critères de performances choisis. La validation a été effectuée sur la période 2009-2014. Les critères d'évaluation du modèle sont identiques à ceux utilisés au niveau de la calibration. C'est-à-dire que le modèle est jugé acceptable lorsque le $Nash \geq 0.5$, $R^2 \geq 0.5$ et PBIAS compris entre ± 0.25 .

3.4 Impact des changements climatiques sur la ressource en eau

3.4.1 Elaboration des scénarios hydrologiques

Pour étudier l'impact du climat futur sur la ressource en eau, l'élaboration de scénarios hydrologiques est un préalable nécessaire. Ainsi, les projections climatiques de référence sont fournies en entrée des modèles hydrologiques, préalablement ajustés afin de générer les débits sur la période 2011-2040. Ces débits générés, qui constituent des scénarios d'évolution de la ressource en eau ont servi de base pour l'évaluation de l'impact potentiel du climat sur la ressource en eau.

3.4.2 Evaluation des modifications hydrologiques

Dans l'optique de déterminer d'éventuels changements dans le régime hydrologique (compte tenu de la modification des variables climatiques) il a été nécessaire de comparer les conditions hydrologiques sur la période historique et future. Cette comparaison s'est appuyée essentiellement sur une analyse graphique des hydrogrammes (historique et projeté). Pour la construction des hydrogrammes, la détermination du début de l'année hydrologique est un préalable nécessaire.

3.4.3 Etude de sensibilité des modifications hydrologiques

La procédure utilisée est identique à celle décrite à la [Section 3.2.3](#) du présent chapitre. L'évolution des débits au cours de la période 2011-2040 a été étudiée à travers des graphiques représentant l'évolution temporelle des modules (débits moyens annuels) sur ladite période. Par ailleurs, l'application des tests statistiques (Mann Kendall et PETTITT) a permis de mesurer la signification des tendances détectées à travers l'analyse graphique et aussi d'identifier des points de ruptures des séries chronologiques.

Resultats

4.1 Identification des projections climatiques de référence

La [Figure 4.1](#) ci-dessous est une évaluation et comparaison des modèles climatiques inventoriés et corrigés de biais. Comme indiqué dans la méthodologie, l'évaluation et la comparaison des modèles se sont appuyées sur la précipitation.. L'analyse du graphique permet de noter des écarts plus ou moins importants entre les données climatiques corrigées et les données in-situ. Sur ce graphique, on note sept (07) modèles (CNRM, CSIRO, ICHEC, IPSL, MIROC, MOHC, MPI) qui présentent une corrélation négative avec les données de référence et trois modèles (CCCma, NCC, NOAA) qui sont corrélés positivement avec les données de référence. En utilisant conjointement les trois critères de performance proposés par le diagramme de Taylor ([Tableau 4.1](#)), on constate que les données du modèle CCCma sont celles qui se rapprochent le plus des observations terrestres.

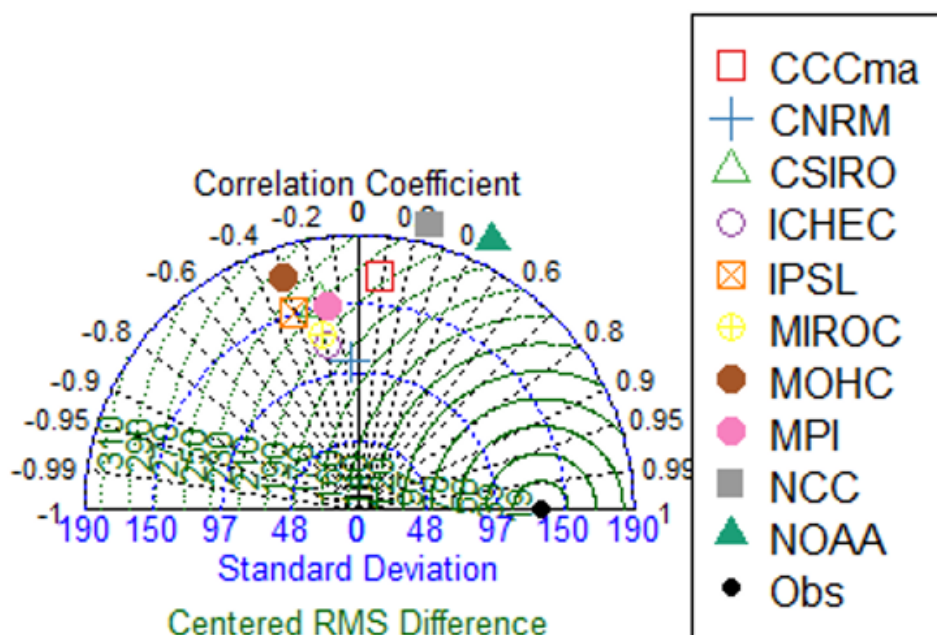


FIGURE 4.1 : Evaluation des performances des modèles climatiques sur les données de précipitation (1981-2005)

TABLE 4.1 : Performances des modèles climatiques

Critères	Référence	CCCma	CNRM	CSIRO	ICHEC	IPSL	MIROC	MOHC	MPI	NCC	NOAA
R	1	0.087	-0.06	-0.19	-0.18	37 -0.31	-0.21	-0.31	-0.16	0.24	0.45
Ecart-type	132	169	107	150	121	149	130	176	148	211	216
RMSE	0	201	171	214	191	225	212	246	209	220	205

4.2 Etude du changement climatique

4.2.1 Evaluation des modifications des variables climatiques par rapport à la période de référence

Les [Figure 4.2](#), [4.3](#) et [4.4](#) sont des illustrations des modifications probables des variables climatiques sur la période 2011-2040. Par rapport à la précipitation, l'analyse graphique révèle l'existence de deux pics. Le premier pic s'observe au mois de mai et le second au mois d'août. Cependant, on constate que l'amplitude des pics est fonction des scénarios climatiques. En effet, avec le scénario optimiste RCP 4.5 on voit que le pic du mois de mai est moins important que celui du mois d'août. La situation inverse est observée avec le scénario RCP 8.5, c'est-à-dire qu'avec ce scénario c'est plutôt le pic du mois de mai qui est le plus important. Qu'à cela ne tienne, les pics de précipitation prévus par chacun des scénarios sont inférieurs à celui observé sur la période de référence (1981-2011). L'examen graphique de la [Figure 4.3](#) révèle des changements dans le régime saisonnier des prélèvements par évapotranspiration. On constate de façon générale que les valeurs minimales d'évapotranspirations projetées connaîtront une hausse plus ou moins importante. Quant aux valeurs maximales, elles seront dans l'ensemble faibles par rapport à la période historique. Par ailleurs, on constate pour l'ensemble des deux scénarios que les pics seront non seulement précoces mais aussi moins prononcés. En effet, dès mi-février on atteindra déjà le paroxysme des prélèvements par évapotranspiration, ce qui était auparavant observé à la première décade du mois de mai. En outre, comparativement aux données historiques, les projections indiquent une hausse de l'évapotranspiration au cours des mois de juillet à septembre, qui constitue l'essentiel de la saison des pluies. Concernant la température, on remarque tout comme la précipitation et l'évapotranspiration une modification du régime saisonnier, particulièrement pour les températures minimales. En effet, comme l'indique le graphique de la [Figure 4.4](#) les extrêmes des températures minimales seront globalement plus importants par rapport à la période de référence. Les températures minimales de mai à octobre seront dans l'ensemble importantes, comparaison faite à la période de référence. Quant aux températures maximales, elles connaîtront également une augmentation au cours des mois de mai à décembre. L'intensité des pics sera globalement égale à la période de référence. Cependant, la date d'apparition des pics sera précoce, au mois de mars.

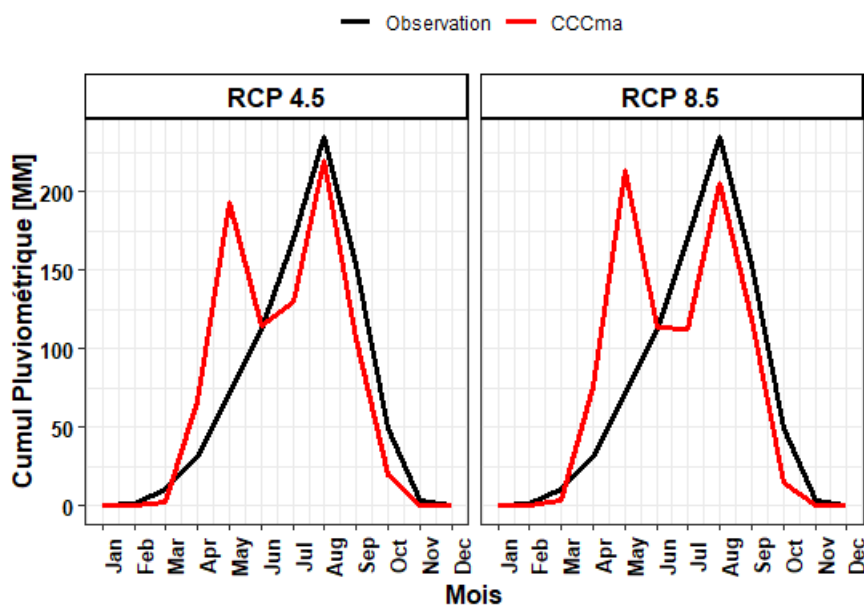


FIGURE 4.2 : Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier de la pluviométrie

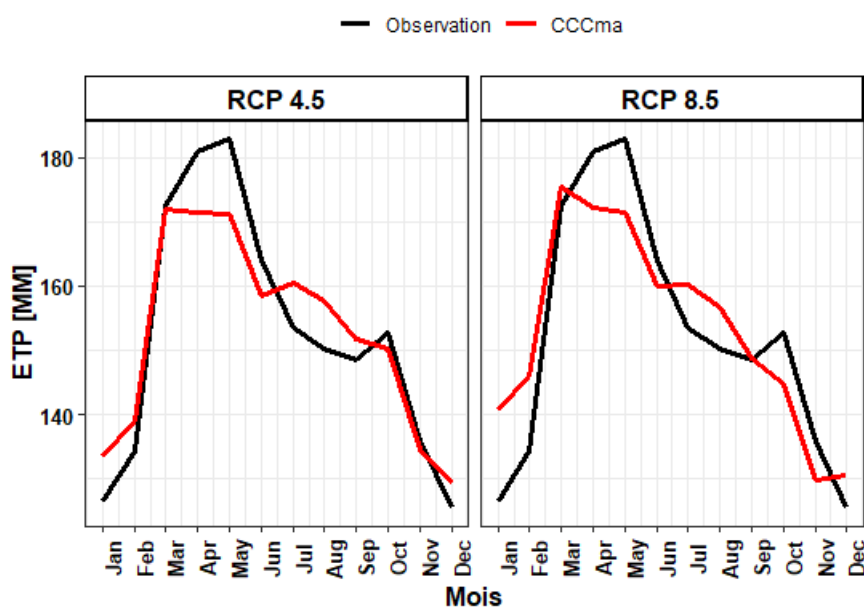


FIGURE 4.3 : Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier des pertes par évapotranspiration

4.2.2 Désagrégation des modifications climatiques

Les graphiques des [Figure 4.5](#), [4.6](#) et [4.7](#) traduisent l'évolution temporelle des variables climatiques sur la période 2011 à 2040. L'analyse des courbes d'évolution montre une tendance à l'augmentation des différentes variables. Cependant, les résultats du test de Man Kendall ([Tableau 4.2](#)) indiquent qu'au seuil défini (5%) la tendance de la série chronologique de précipitation n'est pas significative. Autrement dit, seule la tendance des séries chronologiques d'évapotranspiration et de températures est significative. En plus de présenter des tendances significatives, ces séries comportent également des ruptures, selon les résultats du test de PETTITT ([Tableau 4.3](#)). Toutes ces ruptures correspondent à une hausse et se situent en 2023, 2020 et 2025, respective-

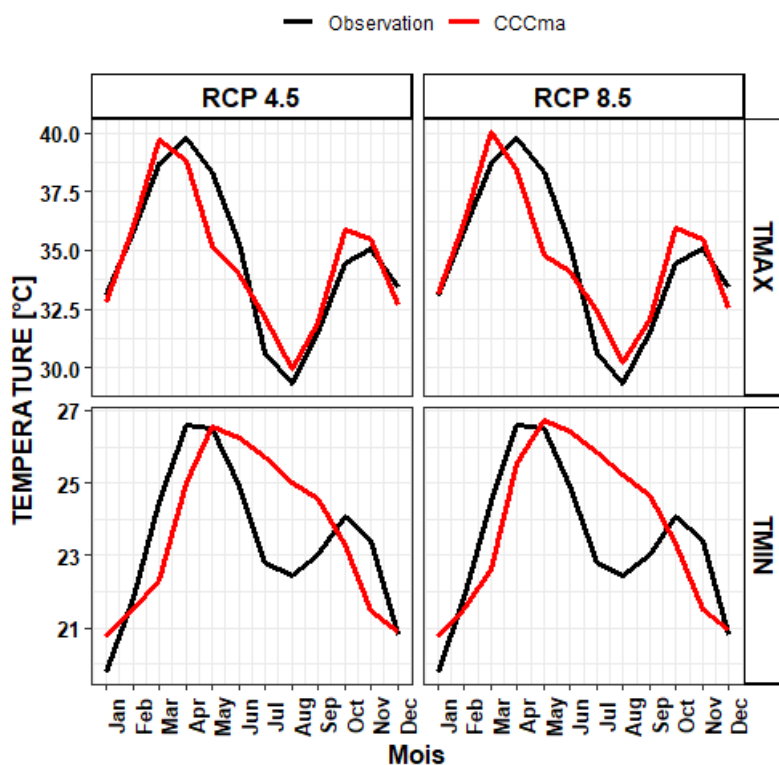


FIGURE 4.4 : Mise en évidence des anomalies dans le régime saisonnier de la température

ment pour l'évapotranspiration, la température maximale et minimale (L'Annexe ii présente graphiquement les résultats du test de PETTITT pour ces différentes variables). Toutefois, on s'aperçoit que suivant les scénarios l'intensité de la rupture est variable, elle plus importante avec le scénario pessimiste (RCP 8.5) (Tableau 4.3).

Du reste, l'examen des données du tableau atteste que le déficit associé à la rupture des températures minimales est le plus élevé (8.5% et 12.67% respectivement pour le RCP 4.5 et 8.5), que l'on considère le scénario optimiste ou pessimiste.

TABLE 4.2 : Etude de stationnarité, moyenant les tests de PETTITT et de Man Kendall

Paramètres	TEST DE PETTITT (RCP4.5/RCP8.5)				TEST DE MAN KENDALL (RCP4.5/RCP8.5)			
	PCP	ETP	TMAX	TMIN	PCP	ETP	TMAX	TMIN
Statistique	80/80	221/221	154/154	203/203	0.17/0.17	0.81/0.81	0.49/0.49	0.65/0.65
P-value	0.51/0.51	$0.55 \cdot 10^{-6}$ / $0.55 \cdot 10^{-6}$	10^{-2} / 10^{-2}	$0.28 \cdot 10^{-5}$ / $0.28 \cdot 10^{-5}$	0.18 / 0.18	0/0	0/0	0/0
H_0	accepté / accepté	rejeté / rejeté	rejeté / rejeté	rejeté / rejeté	accepté / accepté	rejeté / rejeté	rejeté / rejeté	rejeté / rejeté

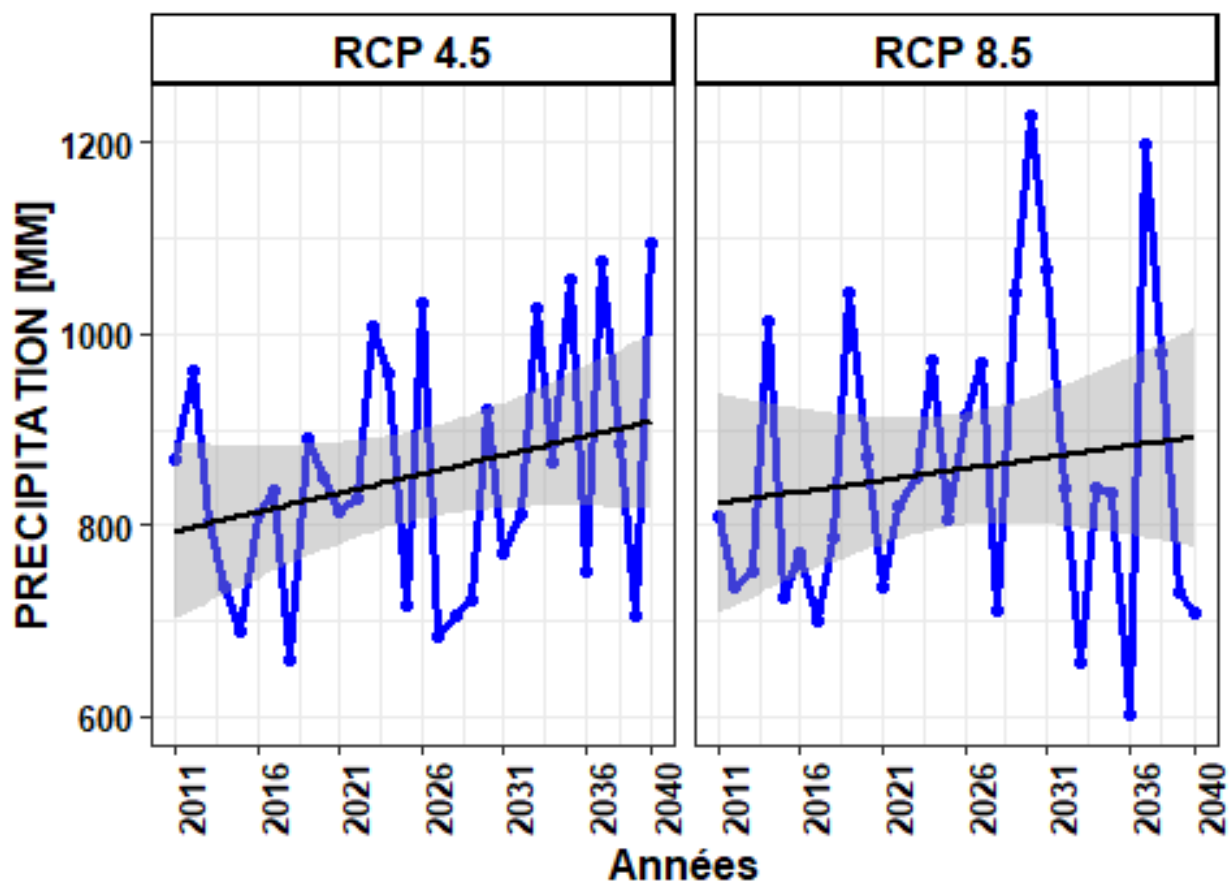


FIGURE 4.5 : Evolution temporelle de la précipitation (2011-2040)

TABLE 4.3 : Caractéristiques des ruptures

Variables	Date de rupture		Moyenne avant		Moyenne Après		Déficit (%)	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
ETP	2023	2023	1780.59	1782.86	1918.84	1922.31	7.76	7.82
TMAX	2020	2020	33.4	33.41	35.62	37.07	6.65	10.95
TMIN	2025	2025	22.7	22.72	24.63	25.6	8.5	12.67

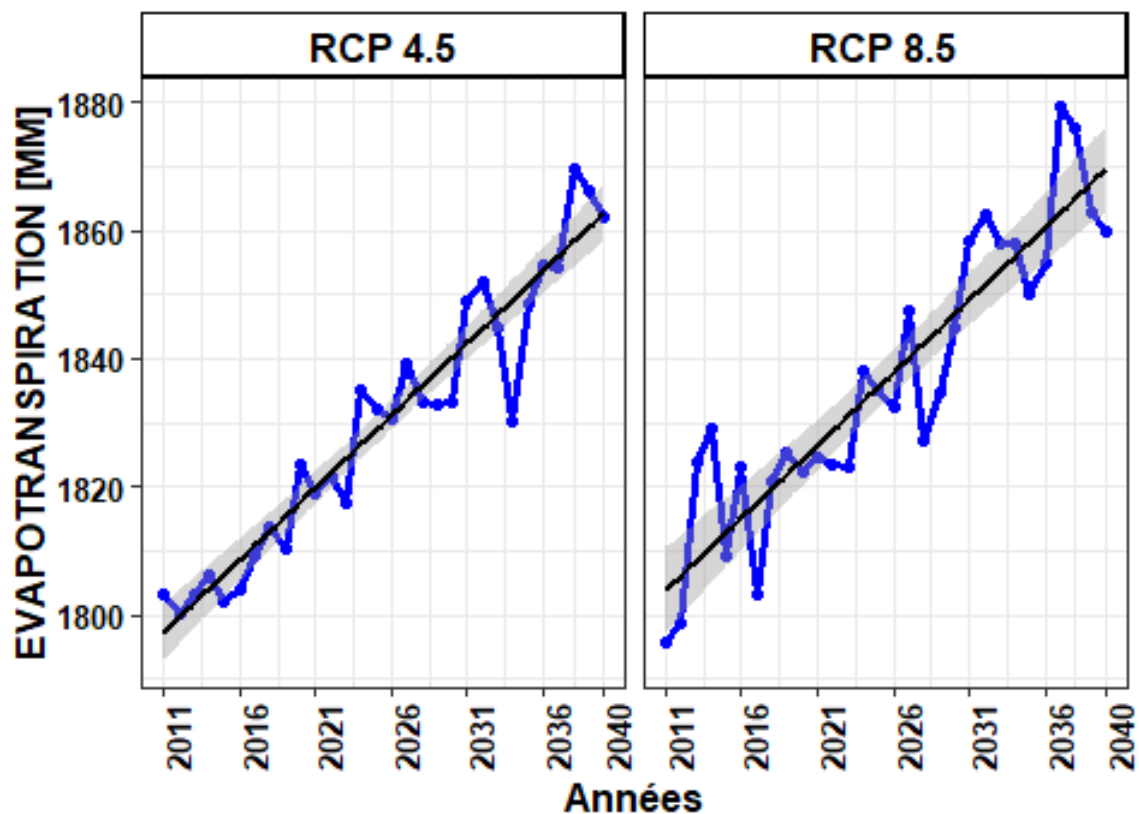


FIGURE 4.6 : Evolution temporelle de l'évapotranspiration (2011-2040)

4.3 Ajustement des modèles hydrologiques : GR4J et SWAT

Dans cette section, nous présentons les résultats de mise en œuvre des modèles GR4J et SWAT. On présentera d'abord les résultats de l'étude sensibilité et ensuite ceux de la calibration et validation.

4.3.1 Etude de sensibilité

En rappel, l'étude de sensibilité s'est portée particulièrement sur le modèle SWAT et a utilisé un jeu de vingt-cinq (25) paramètres. L'objectif étant d'identifier les paramètres sensibles au processus hydrologique du bassin. La [Figure 4.8](#) présente les paramètres par ordre de sensibilité. A partir de l'analyse du graphique de ladite figure, on constate que les débits sont plus sensibles à la variation du paramètre $SLSOIL$. Au total, on dénombre neuf (09) paramètres ($SLSOIL$, HRU_{SLP} , SOL_{AWC} , $CN2$, $ESCO$, $RCHRG_{DP}$, SOL_Z , $EPCO$, $ALPHA_{BF}$) qui influencent la génération des débits.

4.3.2 Calibration et validation

Le [Tableau 4.4](#) résume les résultats de la calibration et de la validation des modèles hydrologiques. Les critères de performances sont dans l'ensemble acceptables, que l'on considère la calibration ou la validation. La [Figure 4.9](#) est une illustration graphique des performances des modèles. Elle compare les hydrogrammes simulés par

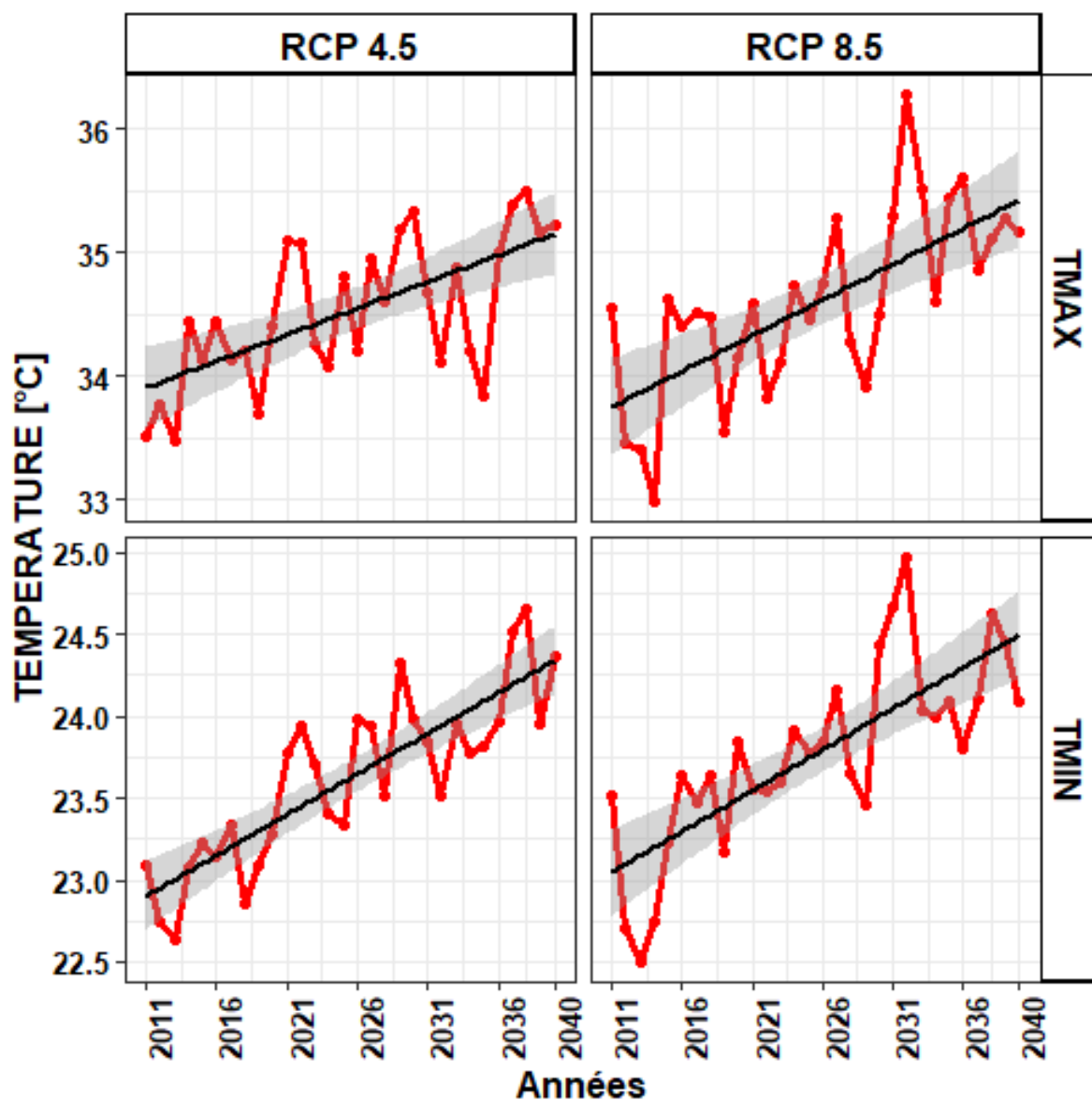


FIGURE 4.7 : Evolution temporelle de la température (2011-2040)

les modèles à l'hydrogramme observé. L'examen du graphique de ladite figure fait ressortir quelques traits de différence. Par exemple, en considérant la calibration, on se rend compte que le modèle GR4J sous-estime grandement les débits de pointe, comparé au modèle SWAT. Mais à la validation, on voit que le modèle s'est nettement amélioré, dans la représentation des hautes eaux.

4.4 Impact des changements climatiques sur la ressource en eau

4.4.1 Elaboration des scénarios hydrologiques

L'étude de l'impact potentiel du changement climatique sur les ressources en eau a nécessité au préalable l'élaboration de scénarios hydrologiques, à l'horizon 2040. Ces scénarios sont obtenus par intégration dans les

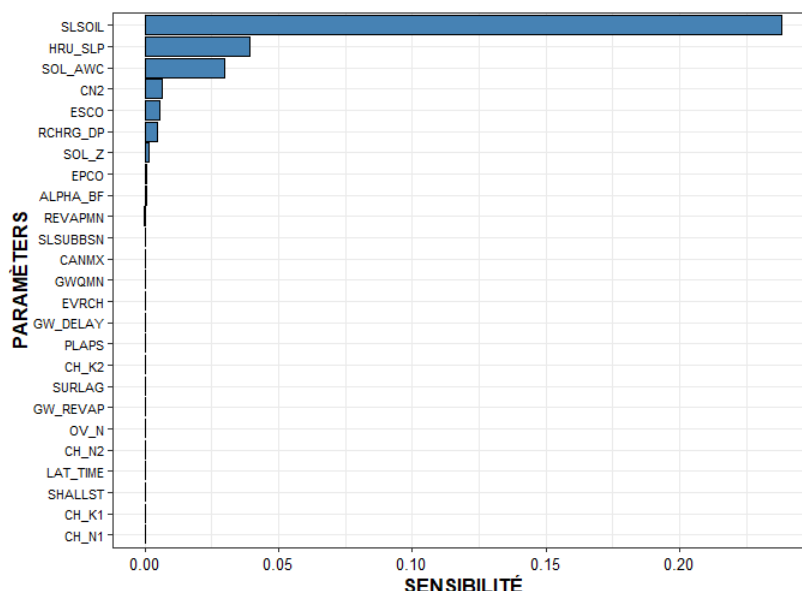


FIGURE 4.8 : Sensibilité des paramètres du modèle SWAT

TABLE 4.4 : Performances des modèles hydrologiques

Modèle	GR4J		SWAT	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation
Nash	0.7	0.8	0.86	0.84
PBIAIS	-1.7	2.3	-5.5	-8.1
R2	0.82	0.81	0.87	0.89

modèles hydrologiques, les scénarios climatiques de référence identifiés en [Section 4.1](#) du présent chapitre. Le [Tableau 4.5](#) ci-dessous présente les quatre scénarios hydrologiques ainsi construits.

TABLE 4.5 : Scénarios hydrologiques

	SWAT	GR4J
RCP 4.5	SH-SWAT-RCP4.5	SH-GR4J-RCP4.5
RCP 8.5	SH-SWAT-RCP8.5	SH-GR4J-RCP8.5

4.4.2 Evaluation des modifications hydrologiques

La [Figure 4.10](#) est une comparaison entre l'hydrogramme historique et projeté. D'une manière générale, les quatre scénarios hydrologiques indiquent qu'au cours de la période 2011-2040, un accroissement des débits pourrait être observé pendant la montée des eaux. Sur la période de décrue, seuls les scénarios du modèle GR4J prévoient un accroissement des débits. Autrement, le modèle GR4J projette des débits globalement supérieurs à ceux observés sur la période historique. Comme le montre les données du [Tableau 4.6](#), le modèle

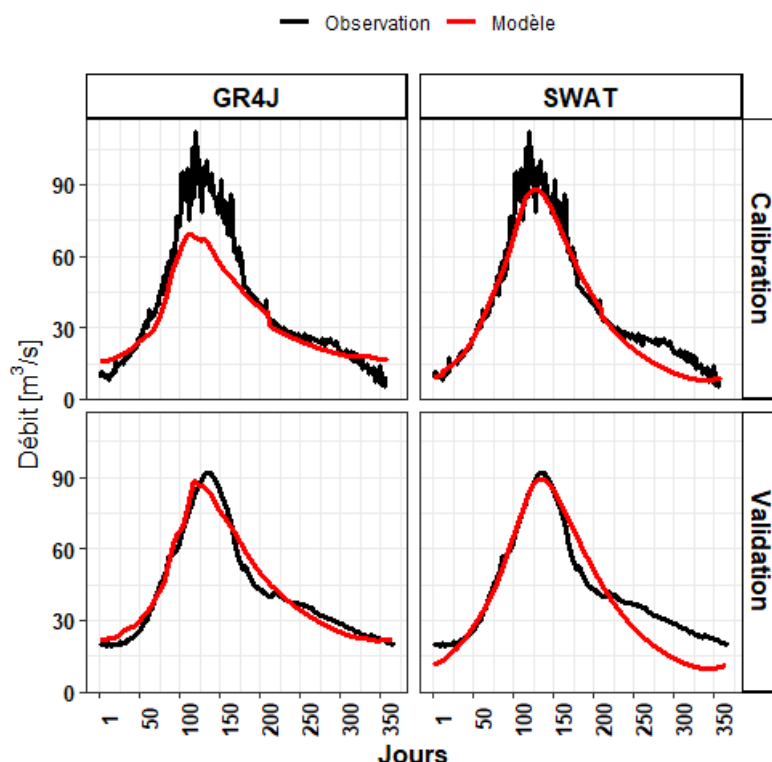


FIGURE 4.9 : Comparaison entre les hydrogrammes observés et simulés

GR4J prévoit une hausse 21.94% et 23.11% des écoulements, respectivement pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Dans cet ordre, les prévisions du modèle SWAT donnent une augmentation 2.16% et 3.79%. Par ailleurs, pour l'ensemble des scénarios hydrologiques, le débit mensuel de pointe sera globalement faible par rapport à la période de référence. Toutefois, une apparition précoce du débit mensuel de pointe est constatée avec le modèle GR4J (dès le mois de septembre). Une comparaison de la distribution des séries chronologiques historiques et projetées est proposée en [Annexe V](#). Du reste, les prévisions du scénario SH-SWAT-RCP8.5 (obtenu par forçage du modèle SWAT avec le scénario RCP 8.5) donnent un hydrogramme avec deux pics, un premier pic en juillet et un second en octobre. Le graphique de la [Figure 4.11](#) met en évidence l'évolution temporelle des modules sur la période historique et projetée. L'examen du graphique de ladite figure révèle que le rythme d'augmentation des débits est plus faible sur la période future que sur la période historique. En effet, comme le montre la [Figure 4.11](#) la pente de la courbe de tendance est plus raide sur la période historique que sur la période future. En général, les prévisions des modèles hydrologiques sont concordantes quant à l'évolution temporelle des modules. La dynamique hydrologique est plutôt fonction du scénario climatique. En effet, les scénarios hydrologiques RCP4.5 (SH-GR4J-RCP4.5 et SH-SWAT-RCP4.5) prévoient des modules moins importants et qui varient très peu comparativement aux scénarios RCP8.5.

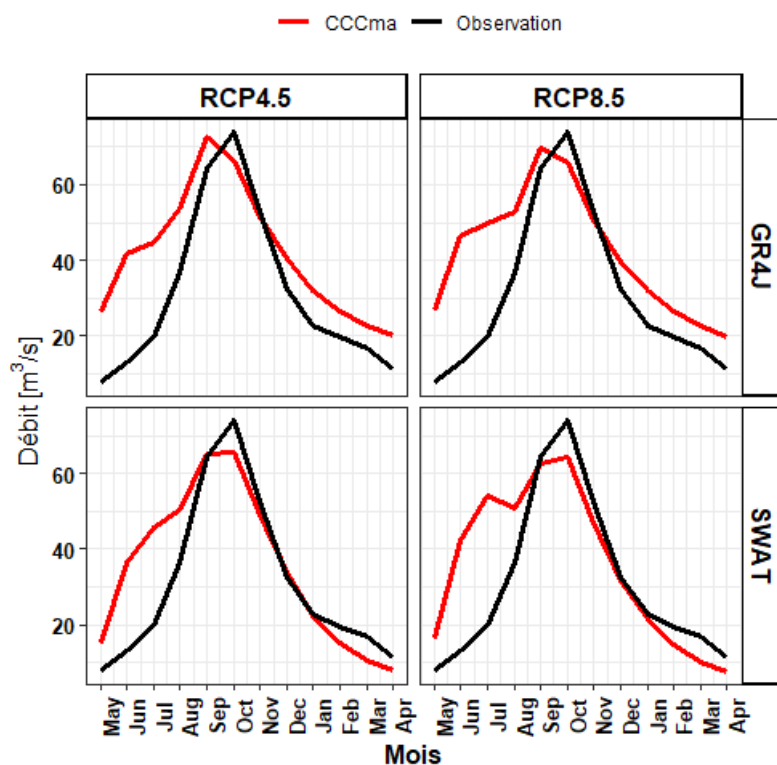


FIGURE 4.10 : Comparaison entre l'hydrogramme de référence et projeté

TABLE 4.6 : Résumé statistiques des débits moyens annuels

Statistique	Référence	GR4J		SWAT	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Moyenne	34.11	41.59	41.99	34.84	35.4
Déficit (%)		21.94	23.11	2.16	3.79

4.4.3 Etude de sensibilité de ces différentes modifications

Les Figure 4.12, 4.13 , 4.14 illustrent respectivement l'évolution temporelle des débits moyens annuels (module), minimums et maximums, sur la période 2011-2040. L'apparence visuelle de la courbe d'évolution de ces différentes variables traduit une tendance à la hausse. Cependant, les résultats du test de Man Kendall (Tableau 4.7) attestent qu'au seuil de 5%, la tendance n'est significative que pour la série des débits minimums. Autrement dit, la tendance des modules et des débits maximaux n'est pas significative au seuil choisi. En ce qui concerne l'existence de rupture dans les séries, seule la série des débits minimums du scénario SH-SWAT-RCP4.5 en comporte, selon les résultats du test de PETTITT (Tableau 4.8). Cette rupture est localisée en 2029 et se caractérise par une augmentation d'environ 18% (Tableau 4.8). La Figure 4.15 qui met en évidence la distribution temporelle des indices standardisés des modules donne de plus amples informations sur l'évolution temporelle des débits. En rappel, l'indice standardisé permet de caractériser les années selon qu'elles

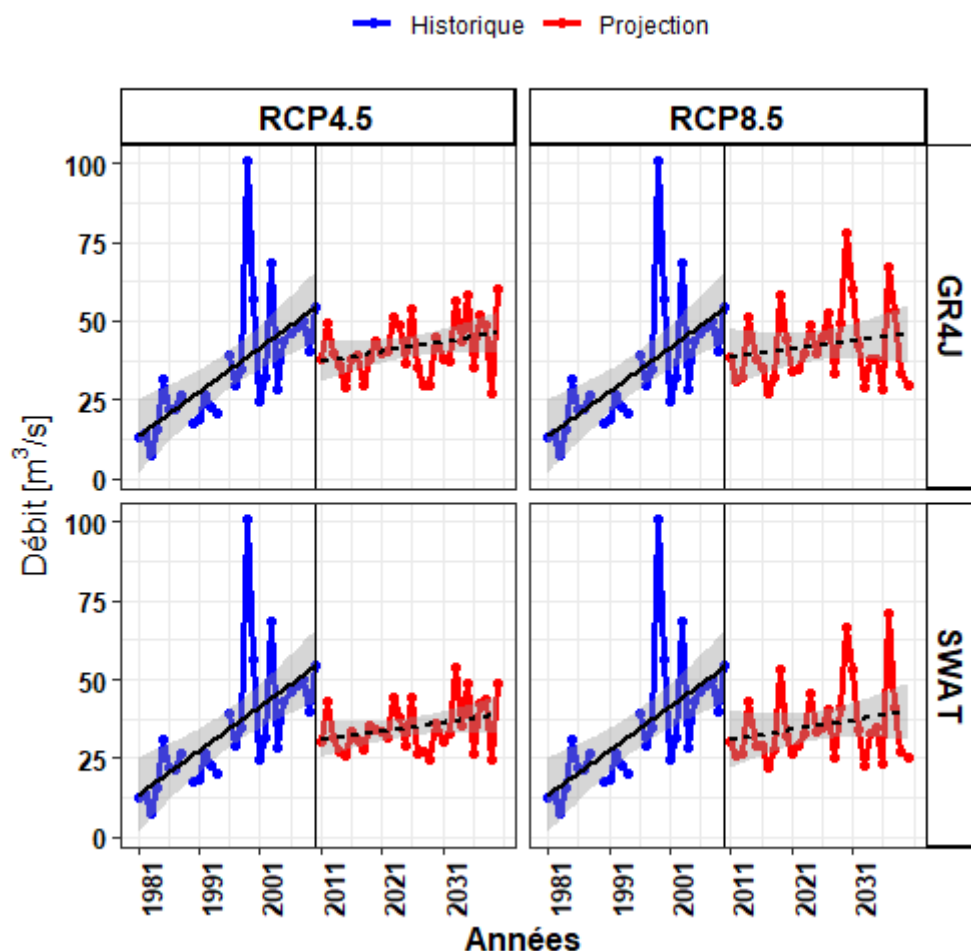


FIGURE 4.11 : Evolution temporelle des modules observés et simulés

soient sèches (Indice<1), normales (Indice=1) ou humides (Indice>1). On remarque donc sur ladite figure une succession de périodes sèche et humide. Selon les scénarios hydrologiques RCP4.5 (SH-GR4J-RCP4.5 et SH-SWAT-RCP4.5), quatre périodes hydrologiques sont attendues au cours de la période 2011-2040 : deux périodes sèches (2011 à 2021 et de 2027 à 2031) et deux périodes humides (2022 à 2026 et de 2032 à 2040). En revanche, les scénarios hydrologiques RCP8.5 (SH-GR4J-RCP8.5 et SH-SWAT-RCP8.5), révèle que les périodes 2011-2023, 2033-2035 et 2039-2040 seront dans l'ensemble sèches et les périodes 2024-2032 et 2036-2038 globalement humides. A ce niveau, les scénarios hydrologiques sont plus ou moins divergentes. Par exemple, pour les années 2029 à 2031, les scénarios RCP8.5 prévoient des écoulements très importants contrairement aux scénarios RCP4.5 qui indiquent que ces années seront les plus déficitaires de la période. En fin, la [Figure 4.16](#) dresse une comparaison du régime pluviométrique et hydrologique. L'analyse du graphique montre que les fluctuations des débits sont en lien avec conditions pluviométriques.

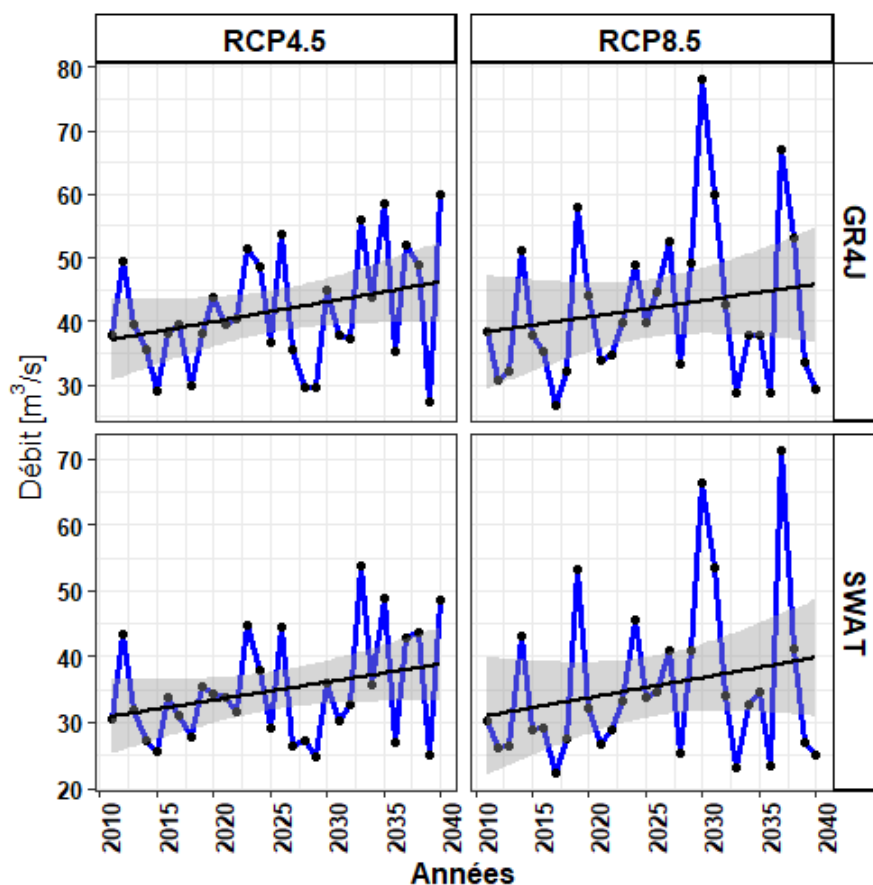


FIGURE 4.12 : Evolution temporelle des débits moyens annuels simulés (2011-2040)

TABLE 4.7 : Résultats de l'analyse de la stationnarité des modules, à partir du test de PETTITT

Modèle	GR4J		SWAT	
	PETTITT	Man Kendall	PETTITT	Man Kendall
Statistique	76/76	0.17/0.10	76/74	0.15/0.14
P-value	0.57/0.57	0.20/0.45	0.57/0.61	0.24/0.27
H0	Accepté	Accepté	Accepté	Accepté

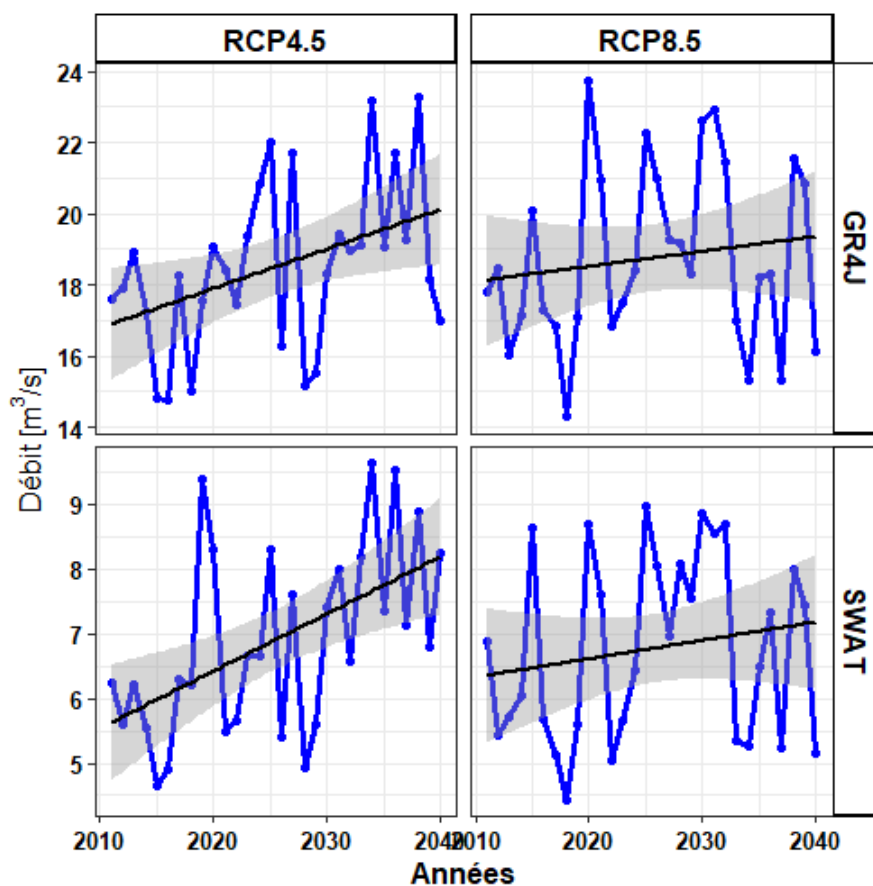


FIGURE 4.13 : Courbe d'évolution temporelle des débits minimums annuels (2011-2040)

TABLE 4.8 : Résultats de l'analyse de la stationnarité des débits minimum annuels, à partir du test de PETTITT

Modèle	GR4J		SWAT	
Test	PETTITT	Man Kendall	PETTITT	Man Kendall
Statistique	128/91	2.43/0.62	145/86	2.93/0.54
P-value	0.06/0.34	0.02/0.53	0.02/0.41	0.00/0.59
H0	Accepté/Accepté	Rejeté/Accepté	Rejeté/Accepté	Rejeté/Accepté

TABLE 4.9 : Caractéristique de la rupture des débits minimums annuels (SH-SWAT-RCP4.5)

Rupture	Moyenne Avant	Moyenne Après	Déficit (%)
2029	32.7	38.56	17.92

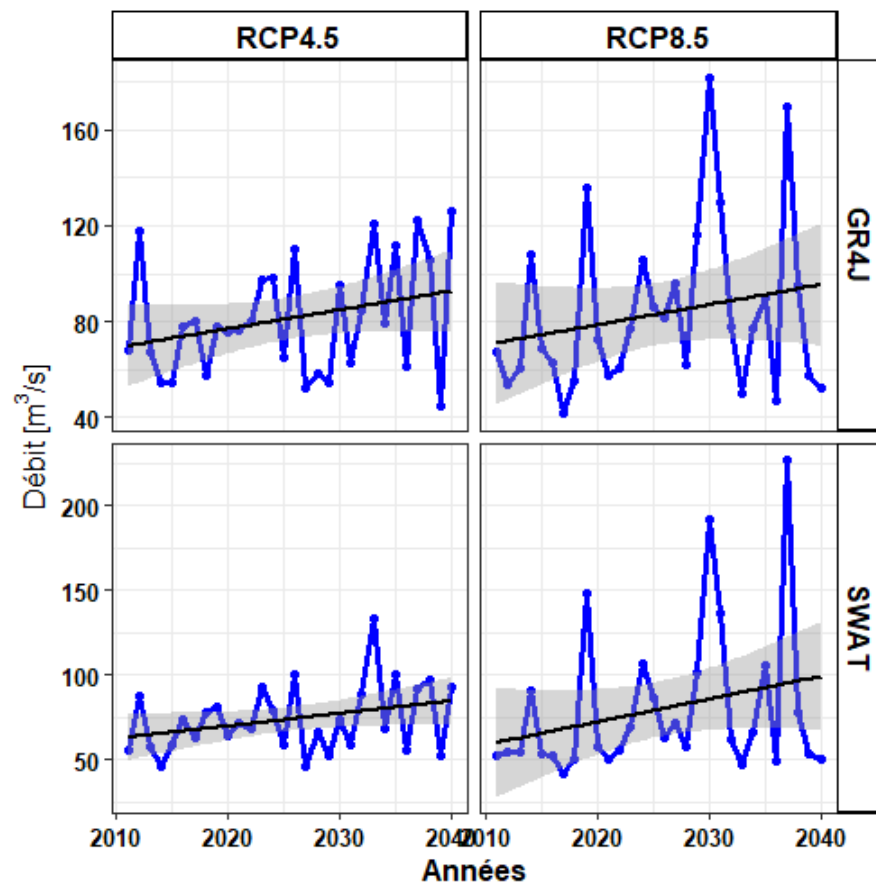


FIGURE 4.14 : Courbe d'évolution temporelle des débits maximums annuels (2011-2040)

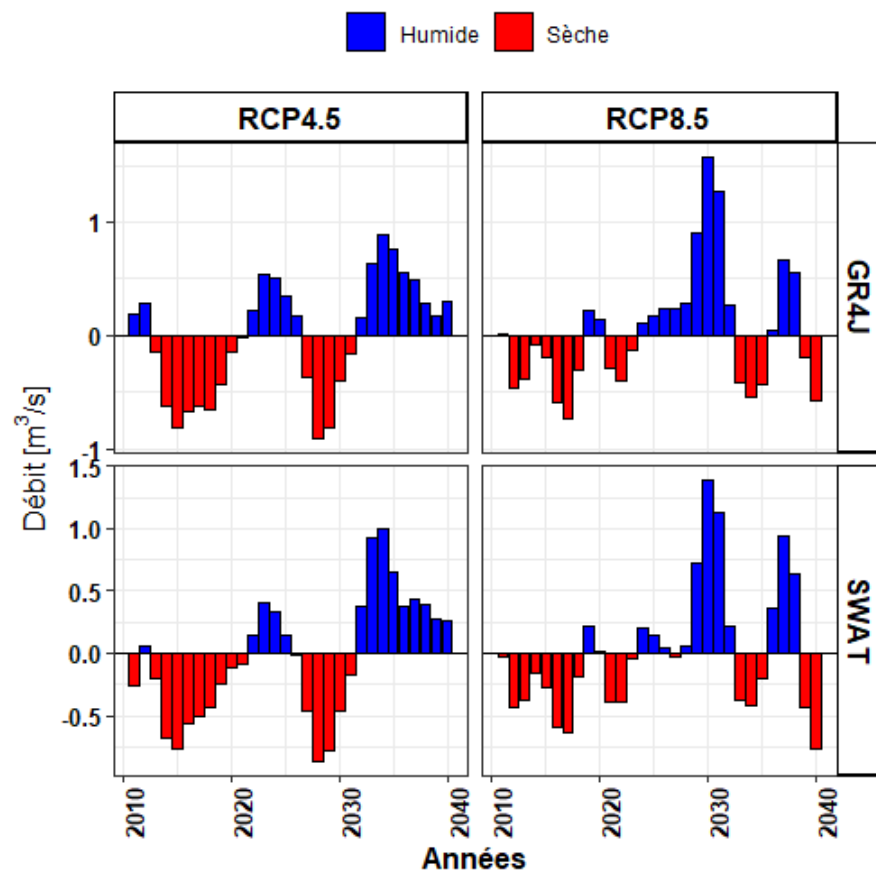


FIGURE 4.15 : Distribution temporelle des indices standardisés de débit

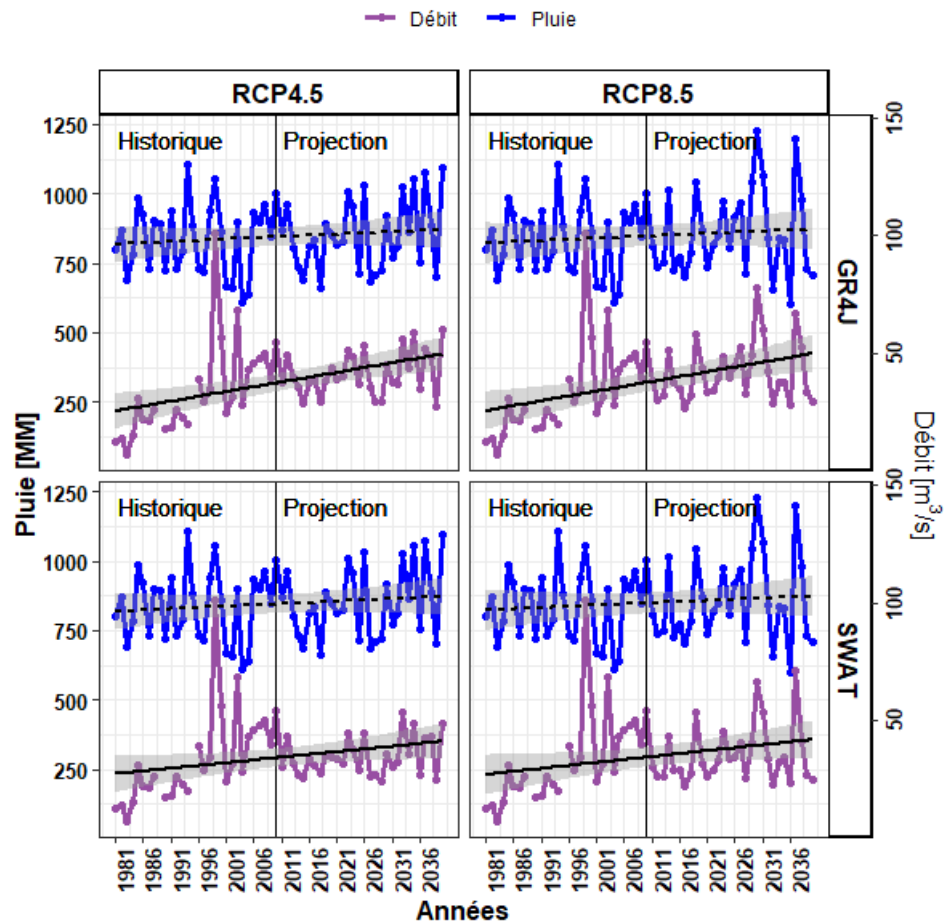


FIGURE 4.16 : Comparaison du régime pluviométrique et hydrologique

TABLE 4.10 : Résultats de l'analyse de la stationnarité des débits maximum annuels, à partir du test de PETTITT

Modèle	GR4J		SWAT	
Test	PETTITT	Man Kendall	PETTITT	Man Kendall
Statistique	87/80	1.50/0.96	84/96	1.70/1.18
P-value	0.39/0.50	0.13/0.34	0.44/0.28	0.09/0.24
H0	Accepté/Accepté	Accepté/Accepté	Accepté/Accepté	Accepté/Accepté

Discussion

Dans cette étude, dix (10) modèles climatiques globaux provenant du projet CMIP5 ont été inventoriés puis traités dans l'optique d'identifier les données les plus pertinentes. La comparaison des données au moyen du diagramme de Taylor a montré que seulement trois des dix modèles comparés sont positivement corrélés avec les observations. Les coefficients de corrélation sont l'ensemble faible, inférieurs à 0.5. La corrélation du modèle NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M (0.43) est la plus forte, suivi du modèle NCC-NorESM1-M (0.24) puis le modèle CCCma-CanESM2 (0.09). Malgré son faible coefficient de corrélation, le modèle CCCma-CanESM2 a obtenu des scores meilleurs pour l'écart-type et l'erreur quadratique moyenne, devant les deux autres modèles suscités. Par conséquent, les données dudit modèle ont été utilisées pour les différentes analyses.

L'étude du climat sur la période 2011-2040 fait ressortir des modifications plus ou moins significatives, pouvant aller à des changements de régime. En effet que l'on considère le scénario optimiste (RCP 4.5) ou pessimiste (RCP 8.5), le démarrage de la saison pluvieuse sera très précoce, dès le mois de mars. Également, les scénarios climatiques prévoient l'apparition d'un pic de précipitation au mois de mai. En fait, l'analyse des scénarios climatiques montre que les pluies apparaîtront dès le mois de mars et deviendront plus importantes en mai. À partir de mai, elles vont régresser progressivement jusqu'à se stabiliser de juin en juillet. À partir de juillet, elles reprendront pour atteindre un second pic en août. Le pic de mai sera même plus important que celui d'août, selon le RCP 8.5. Ces résultats sont en conformité avec ceux de [Sylla et al. \(2016\)](#) qui indiquent que les changements climatiques à venir vont se traduire par une modification spatiale et temporelle du régime de précipitation.

Concernant l'évapotranspiration, on notera une hausse des valeurs minimales, comparativement à la période de référence. Contrairement, les valeurs maximales des prélèvements par évapotranspiration, seront relativement faibles, d'après les deux scénarios. Par ailleurs ces scénarios prévoient une augmentation de l'évapotranspiration pendant les mois de juin à septembre, qui constituent l'essentiel de la saison pluvieuse. Toutefois, il est susceptible d'observer une baisse pendant les mois de mars à mai. Évidemment, selon les projections, ces mois se caractériseront par des températures relativement faibles, comparaison faite à la période historique. À la lumière des résultats des tests statistiques, les changements climatiques à venir vont exacerber les pertes par évapotranspiration du fait de l'augmentation des températures. Il n'y aura pas une hausse en tant que telle de la précipitation mais seulement des fluctuations saisonnières. En effet, le test de Man Kendall précise qu'au seuil défini (5%) la tendance de la série pluviométrique n'est pas significative. Autrement dit, seules les séries

d'évapotranspiration et de température présentent de réelles tendances. Qui plus est, le test statistique de PET-TITT indique que les séries de températures maximales, d'évapotranspiration et de températures minimales connaîtront respectivement des ruptures en 2020, 2023 et 2025. Cependant, si les deux scénarios s'accordent sur la date des ruptures, il n'en est pas le cas pour le déficit associé. Mais toujours est-il que le déficit est plus important avec le scénario pessimiste (RCP 8.5) qu'avec le scénario optimiste (RCP 4.5). En termes de déficit, la rupture des températures minimales est la plus importante avec un déficit de 13%, ensuite celle des températures maximales (11%) et enfin l'évapotranspiration (8%). D'une manière générale, l'évolution des paramètres climatiques sur le bassin du Mouhoun à Nowkuy est assez similaire à la tendance générale qui indique une hausse de l'évapotranspiration en raison de l'augmentation des températures (GIEC, 2013; Faso, 2019; Lautre, 2022)

L'évaluation des impacts des modifications climatiques sur la ressource en eau a nécessité au préalable l'ajustement des paramètres des modèles hydrologiques. L'ajustement des paramètres du modèle SWAT a nécessité en amont une étude de sensibilité. Les résultats de l'étude indiquent que neuf (09) des vingt-cinq (25) paramètres analysés ont une influence significative sur les débits simulés. Le paramètre le plus sensible identifié est la longueur de la pente pour l'écoulement souterrain latéral (SLSOIL) suivie de l'inclinaison de la pente de l'aire de couverture (HRU_{SLP}) et de la capacité en eau disponible dans le sol (SOL_{AWC}). Les travaux de (NEBIE (2020)) sur le bassin du Nakambé à Wayen donnent également les mêmes résultats. Dans l'ensemble, les performances des modèles hydrologiques sont acceptables, tant pour le calage que la validation. En effet, les valeurs des critères de performance satisfont toutes aux conditions définies par Moriasi et al. (2007) ($Nash \geq 0.5$; $R^2 \geq 0.5$; PBIAS compris entre ± 0.25). Toutefois, de la calibration à la validation, on constate une variation plus ou moins importante des performances des modèles. Par exemple pour le modèle GR4J, le critère de Nash est passé de 0.7 à 0.84, soit une augmentation de 20% et 0.80 à 0.84 pour le modèle SWAT, correspondant à une augmentation de 5%. La variation des performances est donc plus importante avec le modèle GR4J qu'avec le modèle SWAT. Il en résulterait donc que le modèle GR4J soit moins stable, comparativement au modèle SWAT. La conséquence directe de l'instabilité d'un modèle est sans doute la non transférabilité des paramètres dans le temps. L'examen graphique des hydrogrammes observé et simulé donne des explications plausibles de la variation des performances des modèles. En effet, l'analyse graphique des hydrogrammes révèle que la variation des débits est en de scie sur la période de calage. La plupart des modèles arrivent très difficilement à reproduire ce type variation, surtout lorsqu'elles ne se justifient pas par les conditions climatiques. Cela explique mieux le fait que les performances des modèles au calage soient faibles comparativement aux performances obtenues à la validation. Autrement dit, il est plus probable que la variation plus ou moins importante des performances des modèles soit liée à la nature des données observées et non aux modèles eux-mêmes. Le forçage des modèles hydrologiques avec les projections climatiques de référence (RCP 4.5 et RCP 8.5) a abouti à l'élaboration de quatre (4) scénarios hydrologiques qui décrivent l'évolution de la ressource en eau. Les projections (scénarios) hydrologiques attestent que le régime des écoulements à la station de Nowkuy sera sujet à un certain nombre de changements, suite à la modification climatique. En effet, les différents scénarios hydrologiques font état d'un accroissement des débits en particulier pendant la phase de montée des eaux. Cet accroissement serait une conséquence de la modification du régime climatique en particulier le régime pluviométrique, qui se caractérise par une installation précoce de la saison des pluies (dès le mois de mars), avec une apparition d'un pic de précipitation au mois de mai. En outre, le scénario SH-SWAT-RCP8.5 prévoit le

passage d'un régime simple à un régime mixte avec deux pics de crues. Evidemment, l'analyse de ce scénario laisse entrevoir deux pics de crues, un pic en juillet et un autre en octobre. En termes d'intensité, le pic de juillet est moins prononcé que celui d'octobre. Cependant, en dépit de l'amélioration des débits, les crues projetées sont globalement inférieures au pic observé sur la période historique (1981-2010). La baisse de l'amplitude des crues est bien probable au regard de la diminution des cumuls pluviométriques mensuels attendus au cours de la période 2011-2040. Par ailleurs, l'analyse qualitative a permis d'avoir un premier aperçu de la stationnarité des variables hydrologiques. En effet, l'apparence visuelle de la courbe d'évolution des modules, des débits maximums et minimums correspond à une tendance à la hausse. Toutefois, au seuil de 5%, la tendance n'est significative que pour les séries des débits minimums, provenant des scénarios hydrologiques RCP4.5 (SH-GR4J-RCP4.5, SH-SWAT-RCP4.5), selon le test de Man Kendall. En revanche, selon le test de PETTITT, seule la série des débits minimums du scénario SH-SWAT-RCP4.5 comporte une rupture, considérant toujours le seuil de 5%. Cette rupture localisée en 2025 se caractérise par une hausse d'environ 18%. Quant à l'évolution des modules, il convient en premier lieu de remarquer qu'elle est pratiquement identique à celle des cumuls pluviométriques annuels. En fait, la tendance des modules et des cumuls pluviométriques est à la hausse, mais non significative. Selon les scénarios hydrologiques RCP 4.5, les modules fluctueront entre 25 et 60 m³/s, les variations interannuelles seront faibles comparativement aux scénarios hydrologiques RCP 8.5 qui indiquent que les modules vont varier entre 22 et 78 m³/s. Autrement, les fluctuations des débits seront plus importantes sous le scénario climatique RCP 8.5 que sur le RCP 4.5. Concernant la succession des périodes hydrologiques, les résultats sont globalement identiques suivant les modèles hydrologiques mais divergent en fonction du scénario climatique utilisé. Par exemple, les scénarios hydrologiques RCP 8.5 disent que les années 2029 et 2030 seront les plus humides de la période. Par contre, les scénarios hydrologiques RCP 4.5 prédisent que ces mêmes années seront déficitaires. Si les changements climatiques attendus suivent le scénario RCP 4.5, il sera observé une succession de quatre périodes hydrologiques. Deux périodes sèches (2011 à 2021 et 2027 à 2031) et deux périodes humides (2022 à 2026 et 2032 à 2040). Les longueurs des périodes sèches et humides seront pratiquement égales. Cependant, si les changements climatiques se mettent en phase avec le scénario climatique RCP 8.5 des variabilités interannuelles seront très visibles à tel enseigne que des périodes ne se dégageront pas de façon claire. On observera tantôt des courtes séquences d'années déficitaires, tantôt des courtes séquences d'années humides.

Conclusion

Que retenir ? Selon les deux scénarios climatiques analysés (RCP 4.5 et 8.5), les changements climatiques à venir vont se traduire par une augmentation de l'évapotranspiration en raison de la hausse de la température. La précipitation quant à elle ne connaîtra pas une réelle hausse, mais des variations interannuelles, plus ou moins importantes. L'étude montre des ruptures en 2020, 2023 et 2025 respectivement pour la température maximale, l'évapotranspiration et la température minimale. Dans cet ordre, le déficit associé à ces différentes ruptures est de 7%, 8% et 9%, selon le scénario RCP 4.5 et 11%, 8% et 13% selon le scénario RCP 8.5. Peu importe le scénario climatique considéré, la hausse des températures minimales est plus importante suivie de l'évapotranspiration. Toutefois, il sied de noter un changement significatif du régime pluviométrique. En vertu des scénarios climatiques, les précipitations s'installeront précocement, ce qui aura pour conséquence l'apparition d'un pic de précipitation au mois de mai. Cette situation entraînera des changements dans le régime des écoulements. Ces changements se traduiront principalement par un accroissement des débits, particulièrement pendant la période de montée des eaux. Un pic de crue pourrait être observé au mois de juin, selon le scénario hydrologique SH-SWAT-RCP4.5. Le modèle GR4J prévoit une hausse de +22% et +23% des écoulements d'ici 2040, respectivement pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Quant au modèle SWAT, il prévoit une augmentation de 2% et 4% des écoulements d'ici 2040. En ce qui concerne l'évolution temporelle des variables hydrologiques, la tendance des débits est à la hausse. Mais au seuil de 5%, seule la tendance des débits minimums du scénario hydrologique SH-SWAT-RCP4.5 est significative. Cette série chronologique est également caractérisée par une rupture en 2029 qui se traduit par une hausse d'environ 18%. De l'analyse comparative des régimes pluviométriques et hydrologiques, il en ressort que les fluctuations dans les débits sont en lien avec les conditions pluviométriques.

Afin d'améliorer la qualité des résultats obtenus dans cette étude, il conviendrait en priorité d'utiliser les sorties d'un plus grand nombre de modèles climatiques régionaux en entrée des modèles hydrologiques afin de réduire les incertitudes liées au forçage climatique futur. Par ailleurs, il serait pertinent de prendre en compte la dynamique spatio-temporelle des états de surface, en fournissant en entrée des modèles hydrologiques des scénarios d'occupation des terres. Pour affiner davantage les résultats, il conviendrait également de prendre en compte la pression démographique sur la ressource en eau, en intégrant les projections sur la demande en eau.

Bibliographie

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., and Van Liew, M. W. (2012). Swat : Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4) :1491–1508.
- Cassou, C. and Guilyardi, [U+FFFD] (2007). Modes de variabilité et changement climatique : Synthèse du quatrième rapport d'évaluation du giec. *La Météorologie*.
- DGRE (2018). Synthèse du suivi des ressources en eau, situation 2017. 116.
- Faso, B. (2019). Pas-pna.
- Fulgence Tiessouma, K., Sandrine Begnakiré, S., Moustapha, C., Pierre Damien, B., and Emma Marie Setelle, P. (2013). Agence de l'eau au burkina faso, capitalisation du processus de mise en place. Rapport technique.
- GIEC (2013). Résumé à l'intention des décideurs, changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. contribution du groupe de travail i au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Report, Etat-Unis d'Amérique : Cambridge University Press.
- Japan Meteorological Agency, Japan (2013). Jra-55 : Japanese 55-year reanalysis, daily 3-hourly and 6-hourly data.
- Kiema, A. (2019). *Analyse de la variabilité récente du régime hydroclimatique du bassin du Mouhoun à Nwokuy*. Thesis.
- Lautre, Y. (2022). 6e rapport du giec : le réchauffement s' accélère,«alerte rouge» pour l'humanité.
- Lebel, T., Amani, A., and Taupin, J.-D. (1996). La pluie au sahel : une variable rebelle à la régionalisation. *Intéactions surface continentale/atmosphère : l'expérience Hapex-Sahel*.
- Lejeune, Q. and SAEED, F. (2019). Étude de l'impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau au burkina faso. report produced under the project “projet d'appui scientifique aux processus de plans nationaux d'adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'afrique subsaharienne”, climate analytics ggmbh, berlin. 33.
- Lienou, G. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au cameroun. *These de doctorat PhD, université de Yaoundé I*.

-
- Mahé, G., Olivry, J. C., and Servat, E. (2005). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Hydroclimatic Variability*, edited by S. Frank, T. Wagener, E. Bøgh, H.V. Gupta, L. Bastidas, C. Nobre and C. de Oliveira Galvão, pages 169–177.
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., and Stouffer, R. J. (2000). The coupled model intercomparison project (cmip). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(2) :313–318.
- Minoungou, B. (2020). *Cartographie régionale du risque d'inondation en Afrique de l'Ouest pour l'appui à l'alerte précoce*. Thesis.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3) :885–900.
- Mouhamed, L., Alcade, C., S., Sarah, D., Edmond, T., Melinda, N., Ibrahim, C., and Peter, P. (2019). Comprendre et interpreter les sorties des modeles climatiques pour la conduite des etudes de vulnerabilite : Guide a l'attention des praticiens. *Climate Analytics*, Berlin, 22.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3) :282–290.
- Ndiaye, B. (2003). Impacts du climat et des aménagements sur le régime hydrologique du mouhoun.
- Nebié, Gaston, C. (2020). *Scénarios d'évolution de la ressource en eau de surface dans le bassin versant du Nakambé à la station de Wayen à partir des scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5*. Thesis.
- Nicholson, S. E. (1981). Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in west africa. *Monthly Weather Review*, 109(10) :2191–2208.
- Nicholson, S. E. and Flohn, H. (1980). African environmental and climatic changes and the general atmospheric circulation in late pleistocene and holocene. *Climatic change*, 2(4) :313–348.
- ONU, N. U. (2018). *Rapport sur les objectifs de développement durable : 2018*. Nations Unies.
- Paturel, J.-E., Servat, E., KOUAME, J., Travaglio, M., Lubes, H., Marieu, B., and MASSON, J.-M. (1998). Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en afrique de l'ouest et centrale non sahélienne.
- Rybski, D. and Neumann, J. (2011). A review on the pettitt test. In *In extremis*, pages 202–213. Springer.
- Sighomnou, D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau.
- Sircoulon, J. (1986). La sécheresse en afrique de l'ouest. *Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973*, pages 75–92.
- Sylla, M. B., Nikiema, P. M., Gibba, P., Kebe, I., and Klutse, N. A. B. (2016). Climate change over west africa : Recent trends and future projections. *Adaptation to climate change and variability in rural West Africa*, pages 25–40.

-
- Tabsoba, M. (2020). *Diagnostic des biais des précipitations des modèles climatiques et évaluation des méthodes de correction sur le bassin du Mouhoun (BURKINA FASO)*. Thesis.
- Yonaba, R. (2020). *Dynamique spatio-temporelle des états de surface et influence sur le ruissellement sur un bassin de type sahélien : cas du bassin de Tougou (Nord Burkina Faso)*. Thesis.
- Yue, S. and Pilon, P. (2004). A comparison of the power of the t test, mann-kendall and bootstrap tests for trend detection/une comparaison de la puissance des tests t de student, de mann-kendall et du bootstrap pour la détection de tendance. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1) :21–37.
- Zougmore, F., DAMIBA, L., D'HAEN, S., and DAYAMBA, S. D. (2019). État des connaissances scientifiques sur les ressources en eau au burkina faso et de l'impact des changements climatiques sur ces ressources. report produced under the project "projet d'appui scientifique aux processus de plans nationaux d'adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'afrique subsaharienne", climate analytics ggmbh, berlin. 58.

Annexes

Annexe i : Modèles climatiques utilisés

TABLE 1 : Modèles climatiques inventoriés

N°	Modèle	Centre
1	CCCma-CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) / Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
3	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO, Australia) and Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE)
4	ICHEC-EC-EARTH	Irish Centre for High-End Computing (ICHEC)
5	IPSL-IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace (France)
6	MIROC-MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
7	MOHC-HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre
8	MPI-M-MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology
9	NCC-NorESM1-M	Norwegian Climate Centre
10	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	National Oceanic and Atmospheric Administration and Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

Annexeii : Analyse de stationnarité des les variables climatiques

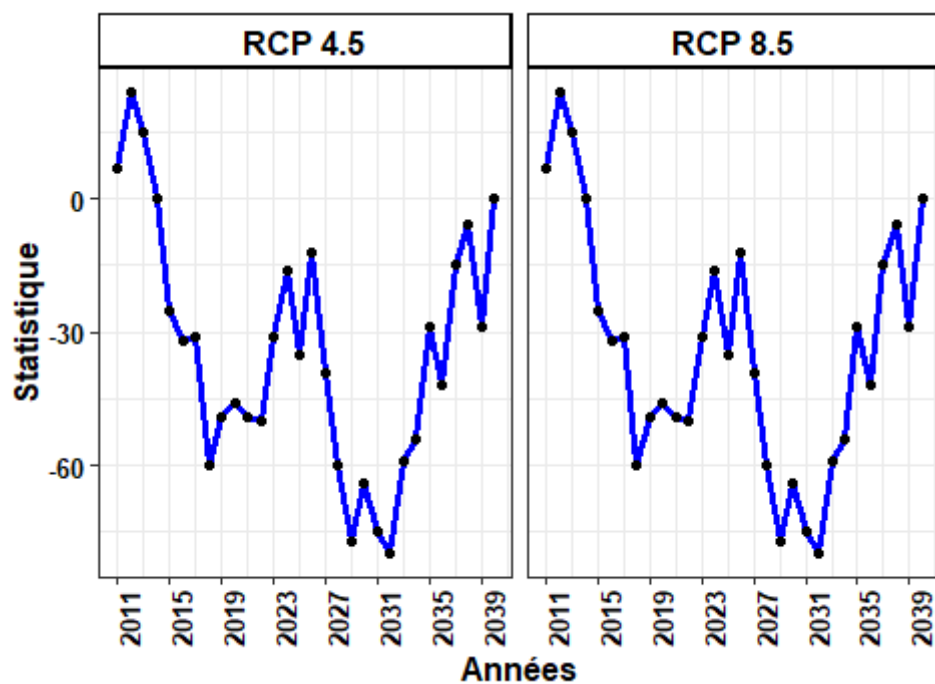


FIGURE 1 : Analyse de stationnarité des données pluviométriques moyennant le test de PETTITT

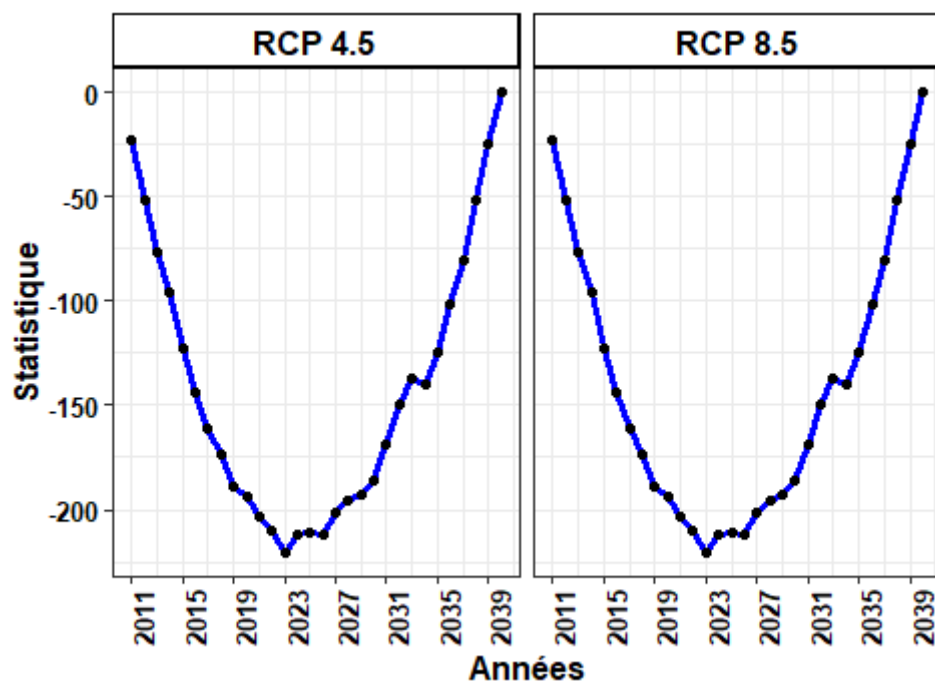


FIGURE 2 : Analyse de stationnarité des données d'évapotranspiration par le test de PETTITT

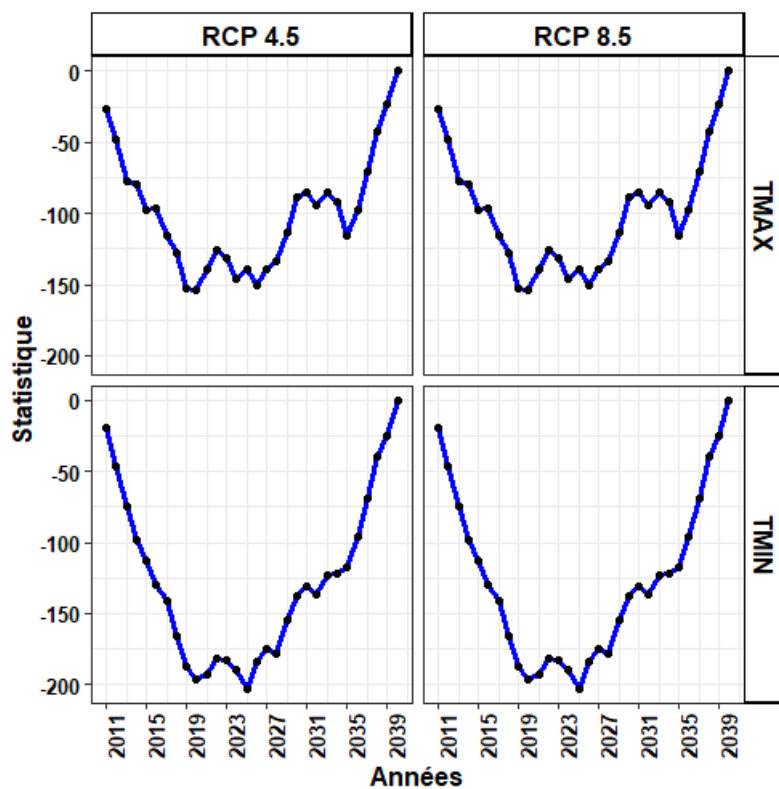


FIGURE 3 : Analyse de stationnarité des températures moyen du test de PETTITT

Annexe iii : Stationnarité des variables hydrologiques

Annexe iv : Modifications hydrologiques

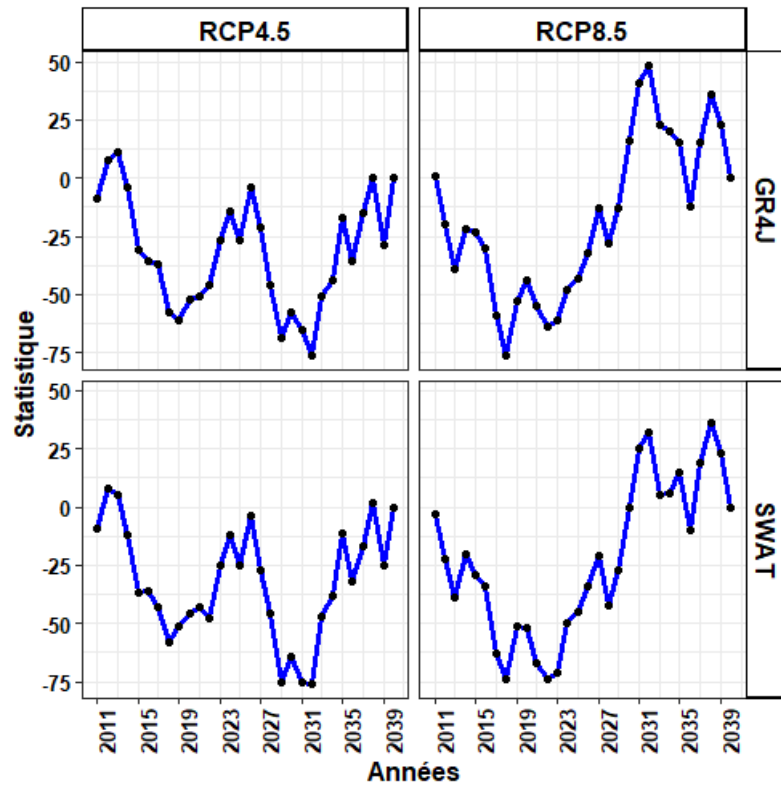


FIGURE 4 : Analyse de stationnarité des données pluviométriques moyennant le test de PETTITT

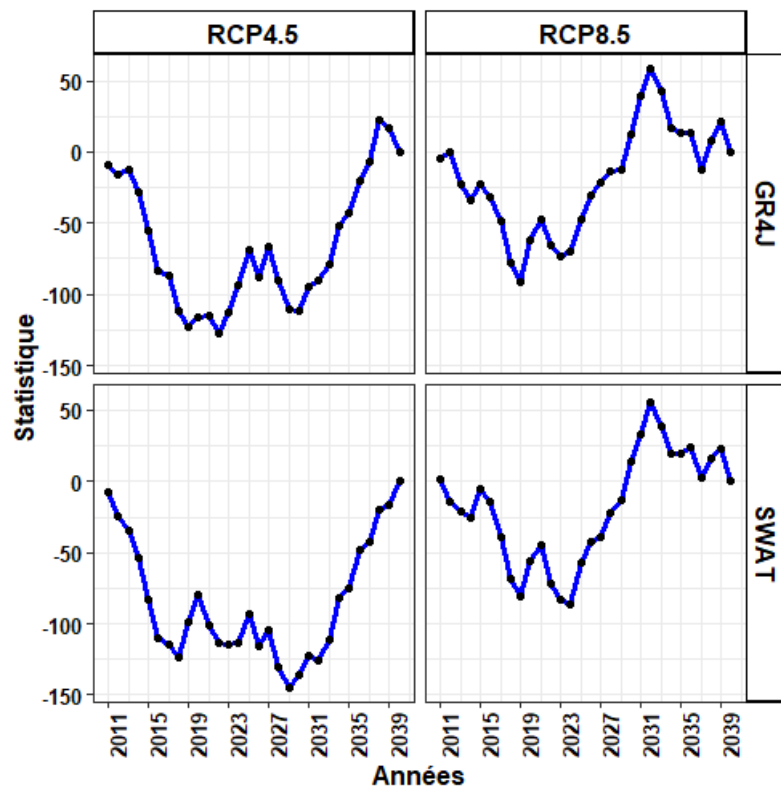


FIGURE 5 : Analyse de stationnarité des débits minimums annuels au moyen du test de PETTITT

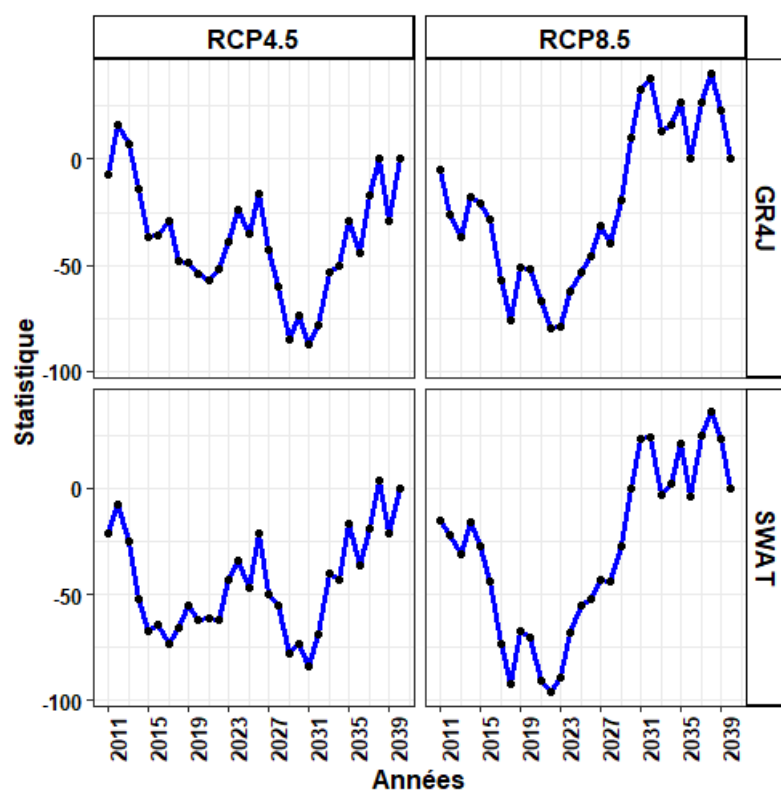


FIGURE 6 : Analyse de stationnarité des débits maximums annuels au moyen du test de PETTITT

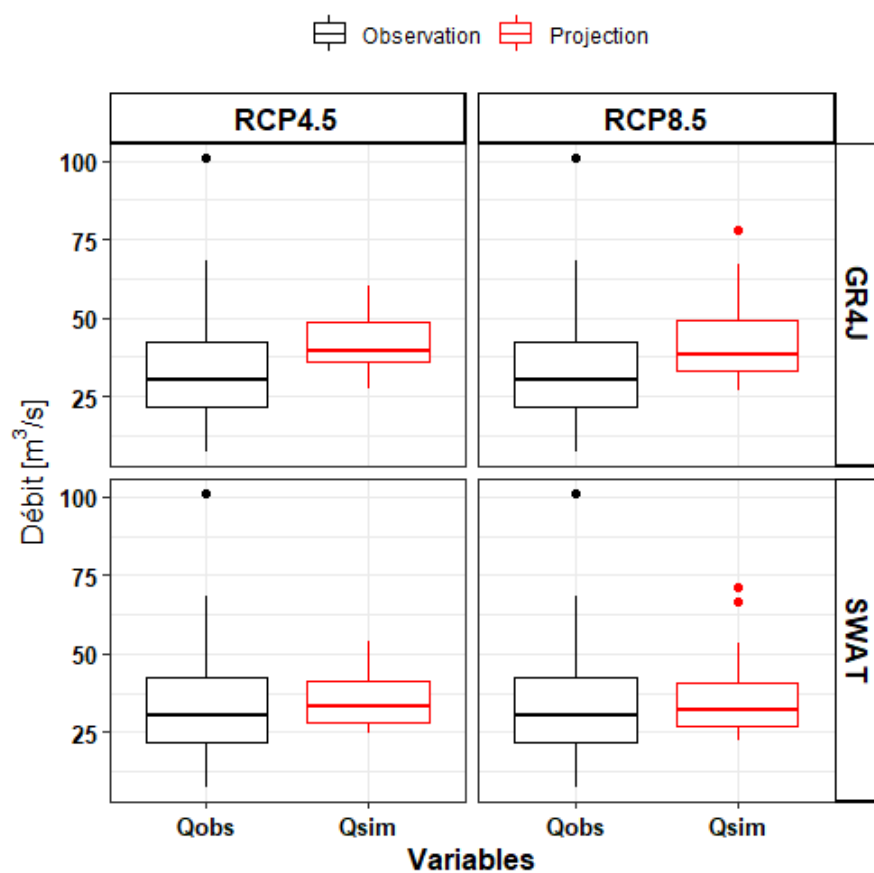


FIGURE 7 : Analyse comparative des distributions des débits moyens annuels observés (1981-2010) et projetés (2011-2040)

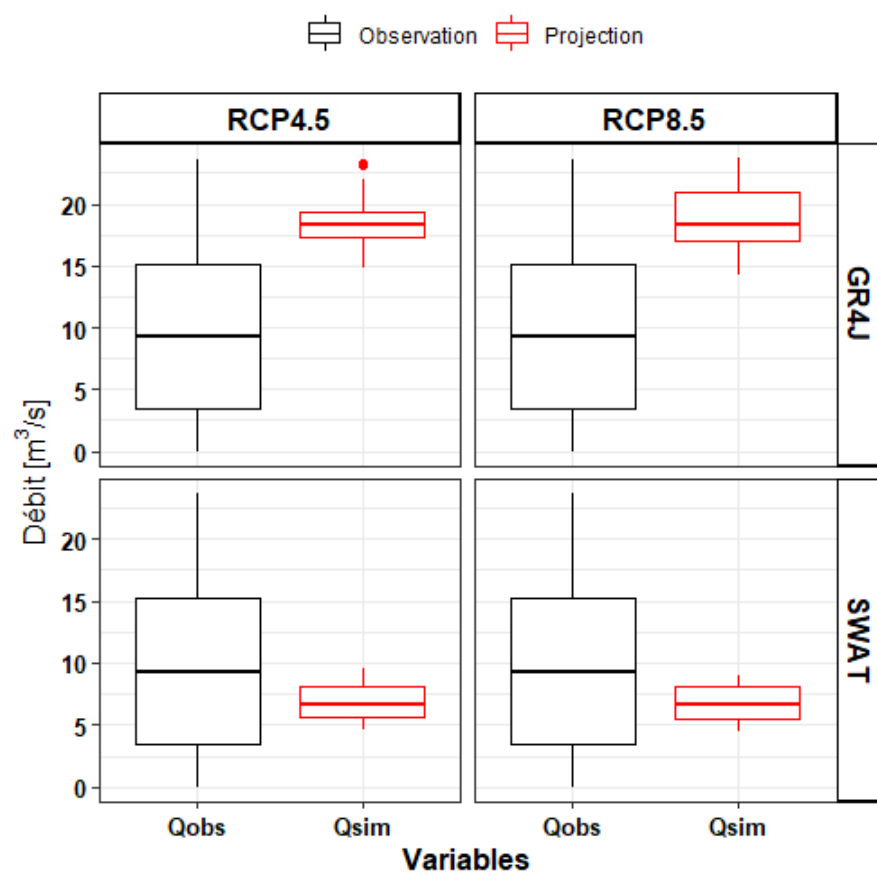


FIGURE 8 : Analyse comparative des distributions des débits minimums annuels observés (1981-2010) et projetés (2011-2040)

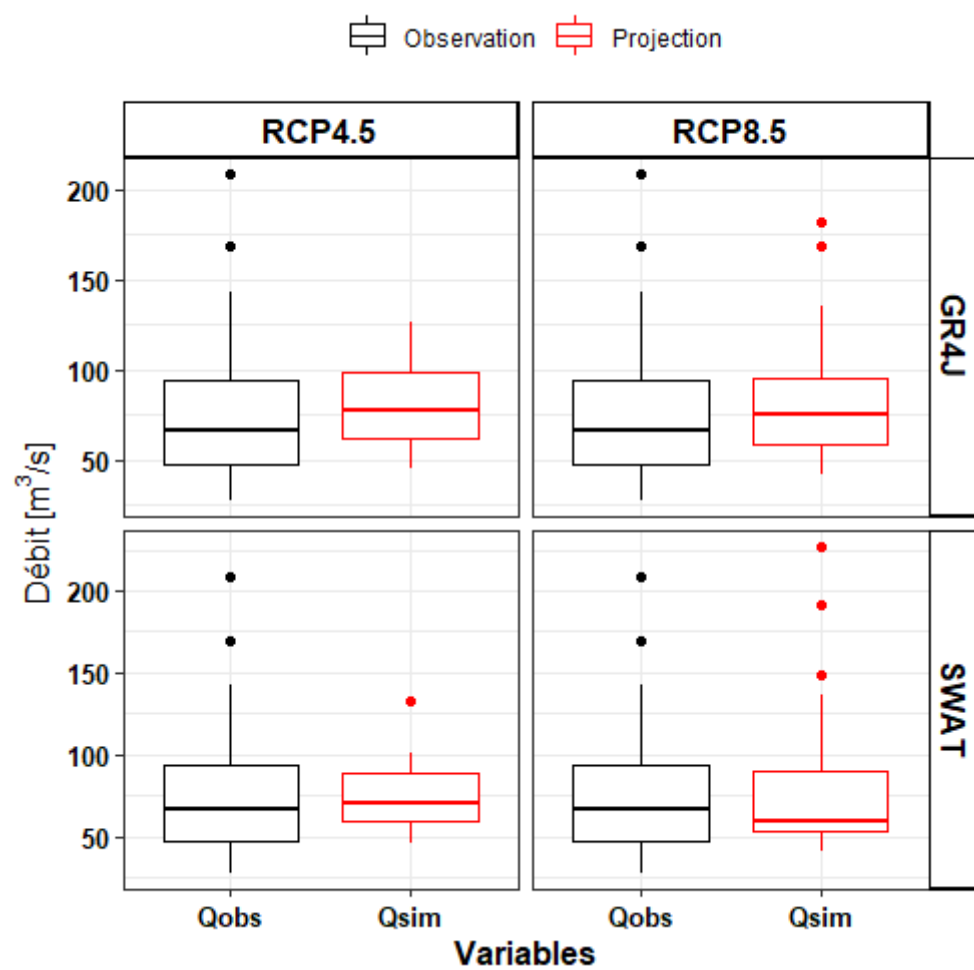


FIGURE 9 : Analyse comparative des distributions des débits maximums annuels observés (1981-2010) et projetés (2011-2040)
