UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

AFFOGNON Sètonou Xavy

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

==========

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DEBITS DU FLEUVE OUEME A BETEROU

==========

Maître de Mémoire

Dr Eliézer BIAO

Maitre-Assistant des Universités CAMES

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2021 - 2022

<< La lanterne de l'expérience n'éclaire que celui qui la porte. >> Conficius

<< Quand l'homme s'identifiera à Dieu, l'évolution humaine aura atteint son pic ; mais les conséquences ne manqueront pas. >> Alcyone

<< Jusqu'au jour où Dieu daignera dévoiler l'avenir à l'homme, toute la sagesse humaine sera dans ces deux mots : Attendre et espérer ! >> Alexandre Dumas

Dédicace

A

AFFOGNON Innocent

&

ZOWEDO Francisca

Remerciements

La gratitude est le secret de la vie. Ainsi, à travers ces quelques lignes je voudrais, avant toute chose témoigner ma profonde gratitude à Dieu pour les multiples œuvres qu'il accomplit dans ma vie et d'ailleurs sans qui rien de tout ceci ne serait possible.

J'exprime ici toute ma reconnaissance :

- Au Dr (Maitre-Assistant) Eliézer Biao, mon Maitre de mémoire, qui malgré ses multiples occupations à accepter l'encadrement de ce travail et pour ses conseils scientifiques.
- Au Prof. Abdoukarim ALASSANE, le Chef du Département d'hydrologie et gestion des ressources en eau, pour ses efforts consentis dans la formation des étudiants ;
- A nos enseignants qui ont partagé leurs connaissances avec nous durant notre formation.
- Aux honorables membres du jury qui contribueront à l'amélioration de ce travail.
- A tous mes camarades d'hydrologie pour l'atmosphère conviviale qui a régnée tout au long de cette formation; un remerciement particulier à Elvire N'KOUE YOKA, Dieudonné ADJAMAIDOTOME et Serge DOSSOU;
- A tous mes ainés d'hydrologie en particulier Samuel TOTIN et Freddy HOUNNONDAHO pour les explications et conseils procurés ;
- A tous les membres de ma famille en particulier Vackily ;

Aux personnes qui de près ou de loin ont veillées à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact du changement climatique sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou. Pour atteindre cet objectif, les données de précipitation, d'évapotranspiration potentielle (ETP), de débits sur la période de référence 1961- 1990 et des données des modèles climatiques régionaux (HIRHAM5, REMO, RCA4) sur la période historique (1961 - 2005) et sur la période future (2006 - 2100) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont utilisées. Une évaluation de la correction des biais par la méthode ISIMIP a été d'abord effectuée. Ensuite, la modélisation des débits sur la période de référence 1961 – 1990 avec les modèles HBV et GR4J a été effectuée pour voir si les deux modèles arrivent à simuler les débits du bassin. Enfin, l'analyse de l'évolution des débits futurs sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec les données de ces modèles climatiques régionaux comme entrées des modèles hydrologiques utilisés est faite.

Les résultats montrent que la méthode ISIMIP utilisée dans cette étude est performante dans la correction de biais des modèles climatiques régionaux. Les bonnes performances des modèles hydrologiques en calage et en validation à court et à long terme et avec les débits moyens annuels montrent l'efficacité de ces derniers à simuler les débits du bassin de l'Ouémé à Bétérou et peuvent donc simuler les débits futurs. L'évolution des débits du bassin pour les horizons futurs, diffère d'un modèle climatique régional à un autre et selon le scénario (RCP4.5 ou RCP8.5). Sous le scénario RCP4.5 il y aura une variation de –21% à 51% des débits moyens annuels par rapport à la période de référence avec les deux modèles hydrologiques pour les trois horizons 2020s (2011-2040), 2050s (2041-2070) et 2080s (2071-2100), représentant le début, le milieu et la fin du siècle. Le scénario RCP8.5 projette une variation de -25% à 60% des débits moyens annuels par rapport à la période de référence pour les deux modèles hydrologiques sur les trois horizons.

Mots clés : Fleuve Ouémé à Bétérou, Changement climatique, Méthode ISIMIP, Modélisation hydrologique, Modèles climatiques.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the impact of climate change on the flows of the Ouémé River at Bétérou. In order to achieve this objective, precipitation, potential evapotranspiration (PET), flows data over the period 1961- 1990 and data from regional climate models (HIRHAM5, REMO, RCA4) over the historical period (1961 - 2005) and the future period (2006 - 2100) under the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 are used. First, an evaluation of the bias correction using the ISIMIP method was done. Then, the modeling of flows over the reference period 1961 - 1990 with HBV and GR4J hydrological models was performed to see if both models are able to simulate the basin flows. Finally, the analysis of the evolution of future flows under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios with data from regional climate models as hydrological model inputs is done.

The results show that the ISIMIP method used in this study area is effective in correcting the bias of regional climate models. The good performance of the hydrological models in calibration and validation in the short and long term and with the annual average flows shows the effectiveness of the latter in simulating the flows of the Ouémé basin at Bétérou and can therefore simulate future flows. The evolution of basin flows for future horizons differs from one regional climate model to another and according to the scenario (RCP4.5 or RCP8.5). Under the RCP4.5 scenario there will be a variation of -21% to 51% in mean annual flows compared to the reference period with the two hydrological models for the three horizons 2020s (2011-2040), 2050s (2041-2070) and 2080s (2071-2100), representing the beginning, middle and end of the century. The RCP8.5 scenario projects a -25% to 60% change in annual mean flows relative to the baseline period for both hydrologic models over the three time horizons.

Key words: Ouémé River at Bétérou, Climate change, ISIMIP method, Hydrological modeling, Climates models

Sigles et acronymes

CORDEX : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

DG-Eau : Direction Générale de l'Eau

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

HIRHAM5 : Danish Meteorological Institute Regional Climate Model

INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

ISIMIP : Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project

MCG : Modèles Climatiques Globaux

MCR : Modèles Climatiques Régionaux

P : Pluie

Q : Débit

RCA4 : Rossby Center Atmospheric model, version 4

REMO : Regional Model (Modèle régional)

RGPH : Recensement Général de la population et de l'Habitation

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du bassin de l'Ouémé à Bétérou 9
Figure 2 : Carte pédologique du bassin 10
Figure 3 : Carte géologique 11
Figure 4 : Relief et les courbes de niveau 12
Figure 5 : carte du réseau hydrographique 12
Figure 6 : Structure du modèle HBV 17
Figure 7 : fonctionnement du modèle GR4J (d'après Perrin et al., 2003) 18
Figure 8 : Comparaison entre les pluies moyennes observées et les MCR non corrigés 23
Figure 9 : Comparaison entre les pluies moyennes observées, MCR non corrigés et MCR corrigés 23
Figure 10 : Comparaison entre les MCR Corrigés 24
Figure 11 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés par HBV en calage et validation. 25
Figure 12 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés par GR4J en calage et validation 26
Figure 13 : Hydrogrammes des débits observés et simulés par HBV en calage et en validation à court terme. 27
Figure 14 : Hydrogrammes des débits observés et simulés par GR4J en calage et en validation à court terme 28
Figure 15 : Hydrogrammes des débits moyens annuels observés et simulés par HBV en calage et validation. 29
Figure 16 : Hydrogrammes des débits moyens annuels observés et simulés par GR4J en calage et validation 30
Figure 17 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP4.5 par HBV 31
Figure 18 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP4.5 par GR4J 32

Figure 19 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP8.5 par HBV 33
Figure 20 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP8.5 par GR4J 34

Liste des tableaux

Tableau 1: Evolution démographique 13
Tableau 2 : Proportion population agricole 14
Tableau 3 : critères d'évaluation de performance 24
Tableau 4 : Performance des modèles sur le long terme 26
Tableau 5 : Performance des modèles à court terme. 28
Tableau 6 : Performance des modèles avec les débits moyens annuels 30
Tableau 7 : Taux de changement (%) des débits moyens annuels des différents horizons par rapport à la période de référence sous le scénario RCP4.5 35
Tableau 8 : Taux de changement (%) des débits moyens annuels des différents horizons par rapport à la période de référence sous le scénario RCP8.5 36

Table des matières

Dédicace ii
Remerciements iii
Résumé iv
Abstract v
Sigles et acronymes vi
Liste des figures vii
Liste des tableaux ix
Table des matières x
INTRODUCTION GENERALE 1
1. Contexte et justification 1
2. Revue de littérature 2
2.1. Clarification des concepts 2
2.2. Etat des connaissances 4
3. But de la recherche 7
4. Problème et question de Recherche 7
5. Objectifs de l'étude 7
5.1. Objectif général 7
5.2. Objectifs spécifiques 7
Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes 8
1.1. Milieu d'étude 9
1.1.1. Localisation 9
1.1.2. Climat, sol, végétation 10
1.1.3. Géomorphologie, géologie et hydrogéologie 10
1.1.4. Relief et réseau hydrographique 11
1.1.5. Démographie des communes du bassin 13

1.1.6. Activités socio-économiques 13
1.2. Données utilisées 14
1.3. Matériels 14
1.4. Méthodes 15
1.4.1. Contrôle de la qualité des données 15
1.4.2. Modélisation hydrologique du bassin 16
1.4.3. Analyse de l'évolution future des débits par rapport à la période de référence 19
Chapitre 2 : RESULTATS ET DISCUSSION 21
2.1. Résultats 22
2.1.1. Evaluation de la correction des biais des MCR 22
2.1.2. Evaluation des performances des deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J) sur la période de référence 1961-1990 24
2.1.3. Analyse de l'évolution future des débits sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 30
2.2. Discussion 36
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 38
Références bibliographiques 40

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

Aucun pays n'échappe aujourd'hui aux impacts des changements climatiques. Mais plus que les autres parties du monde, l'Afrique de l'ouest est exposée aux manifestations du phénomène et son impact sur les ressources en eau est actuellement perceptible (Tossounon, 2009). La mobilisation autour de l'eau depuis quelques dizaines d'années est motivée par des préoccupations qui dépassent la ressource en elle-même : les enjeux sociaux, politiques et stratégiques sont majeurs (Obada, 2017). Les variabilités hydrométriques ont un impact direct sur les ressources en eau, puisqu'en partie, le renouvellement de la ressource et la recharge de la nappe en dépendent.(Cocker et al., 2019). Ainsi, une inquiétude croissante gagne l'opinion publique quant aux impacts de ces changements sur les ressources naturelles et les populations (Obada et al., 2016).

Au Bénin en particulier, les grands fleuves comme le fleuve Ouémé n'échappent pas aux effets néfastes de ces changements climatiques. Face à ces changements, la modélisation pluie-débit est l'outil obligatoire pour anticiper les conséquences hydrométriques des pluies observées ces dernières années (Amoussou et al., 2015). La connaissance des débits d'un cours d'eau est un instrument indispensable à la gestion des systèmes aquatiques (prévisions de débits, gestion d'ouvrages de retenue, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, etc.) (Kodja, 2018). Alors, il convient donc que la modélisation pluie-débit apparaît comme un outil précieux pour la reconstitution des débits historiques et la prévision des débits futurs. En raison de la faible densité du réseau climatique, on est amené souvent à utiliser les sorties des Modèles Climatiques Régionaux (MCR) comme données de forçage des modèles hydrologiques (Obada, 2017) pour la prévision de ces derniers. Mais les MCR doivent être corrigés avant usage puisqu'ils contiennent des biais.

C'est dans ce contexte, que le présent travail propose d'étudier l'Impact du changement climatique sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou. Il est à noter que plusieurs études similaires ont été réalisées sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou à ce sujet comme celle de Biao, 2017, Lawin et al., 2018 mais l'avantage de cette étude est l'utilisation de la méthode de correction de biais ISIMIP pour la correction des MCR (HIRAM5, RCA4 et REMO).

2. Revue de littérature

2.1. Clarification des concepts

- Changement climatique : Pour le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique se réfère à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistant sur une longue période de temps (décades ou plus). Le changement climatique peut être dû aux processus naturels internes ou à des forçages exogènes ou à des changements anthropogéniques persistants dans l'atmosphère ou dans les usages du sol.

Selon la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Les "Changements Climatiques" sont des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables**.**

- Modèles climatiques : Selon le GIEC les modèles climatiques sont comme des programmes informatiques extrêmement sophistiqués qui englobent notre compréhension du système climatique et simulent, avec autant de fidélité que possible, les interactions complexes entre atmosphère, l'océan, la neige et la glace, l'écosystème mondial et divers processus chimiques et biologiques.

Un modèle climatique est la représentation numérique de la planète et des interactions entre ses différents réservoirs qui modulent le climat : l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. L'espace géographique numérique est composé de cases, appelées les mailles. Les interactions entre mailles sont modélisées par un certain nombre d'équations mathématiques. Plus la maille est petite, plus le modèle est précis et donc plus il est fiable. Un modèle climatique cherche à approcher le plus possible la réalité, il essaie de représenter au mieux les forces qui induisent les mouvements atmosphériques, océaniques ou terrestres. Pour cela, le modèle part de conditions initiales connues des paramètres climatiques tels que la température, le rayonnement, l'humidité... et les fait évoluer en suivant le formalisme mathématique (Source : www.futura-sciences.com/planète/définitions/climatologie_modèle-climatique-12986/).

Les modèles climatiques nous permettent d'avoir une idée du climat futur, pour pouvoir identifier les incidences des émissions de gaz à effet de serre sur la planète. Les modèles

climatiques globaux (MCG) montrent comment le climat pourrait évoluer à l'échelle de la planète. Leur résolution spatiale n'est toutefois pas assez fine pour représenter le climat local d'un petit pays alors on utilise les modèles climatiques régionaux (MCR) pour cela.

Les MCR sont des outils de désagrégation dynamique dont le but est de résoudre régionalement la thermodynamique de l'atmosphère en étant alimenté aux bornes par un modèle forceur (un MCG par exemple). Les MCR sont essentiellement des MCG mais sur des domaines limités. Autrement dit, ils intègrent les mêmes processus physiques, variables pronostiques et les types de paramétrisations. Ces modèles sont utilisés pour réduire l'échelle horizontale mondiale des MCG en échelle régionale. En effet, les MCG ont une résolution horizontale de 100-300km tandis que les MCR peuvent être exécutés à une résolution horizontale de 10-50km. Bien que les MCR tout comme les MCG, aient les mêmes besoins de paramétrisation, la réduction d'échelle spatiale des MCR signifie que les détails de la paramétrisation sont généralement très différents de ceux des MCG (rappelons que la définition de base d'une paramétrisation est le besoin d'exprimer des quantités sous-échelle en termes de variables calculé à l'échelle du modèle) (Obada, 2017).

- Scénarios climatiques : Les scénarios climatiques sont utilisés pour estimer l'état futur du climat en intégrant à la fois la tendance à long terme sur la base des émissions de gaz à effet de serre, tout en associant les variations naturelles et pour analyser les solutions afin d'atténuer les changements possibles. Des scénarios ont été élaborés par le GIEC comme les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) qui proposaient six grandes familles d'avancement des émissions qui sont A1B, A1FI, A1T, A2, B1, B2 pour pouvoir faire cette estimation. Avec les modifications significatives dont le monde est sujet actuellement, de nouveaux scénarios appelés RCP (Profils Représentatifs d'évolution de Concentration) ont été mis au point et la description d'après Haensler et al. (2013) cité par Obada (2017) est présenté ci-dessous :

RCP2.6 : Ce scénario, aussi appelé RCP3PD, représente la trajectoire du forçage radiatif qui atteint un pic de 3W/m² avant 2100, suivi par un déclin (PD=Pic-Déclin). Le profil choisi descend à 2,6W/m² en 2100 (Van Vuuren et al., 2007). Le rapport RE4 n'a identifié que 6 scénarios qui conduisent à des niveaux de forçage inférieurs à 3W/m². Cependant, il existe déjà plus de 20 scénarios publiés qui conduisent à un niveau de forçage semblable à RCP2.6.

RCP4.5 : Ce scénario décrit la stabilisation sans dépassement à 4,5W/m² et une stabilisation après 2100 (Clarke et al., 2007). RCP4.5 correspond à la catégorie des scénarios du rapport RE4 qui contient la grande majorité des scénarios évalués, à savoir 118.

RCP6 : Ce scénario est également semblable au RCP4.5, avec une stabilisation sans dépassement à 6W/m² et une stabilisation après 2100 (Fujino et al., 2006). Le nombre de scénarios d'atténuation conduisant à 6W/m² publiés dans la littérature est relativement bas, mais au même moment plusieurs scénarios de référence (Politique non climatique) correspondent à ce niveau de forçage.

RCP8.5 : Ce scénario correspond au profil du forçage radiatif en pleine croissance conduisant à 8.5W/m² en 2100 (Riahi et al. 2007). Il conduit à un niveau de forçage autour du 90^{e} percentile des scénarios de référence, mais récemment 40 scénarios ayant un niveau de forçage semblable ont été identifiés (Van Vuuren et al., 2011).

- Modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit : C'est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique).

De nombreuses classifications de modèles hydrologiques existent dans la littérature. En effet, un grand nombre de caractéristiques des modèles peut être utilisé pour construire une classification. De plus, la plupart des modèles hydrologiques sont des assemblages de modules ayant des propriétés différentes: un modèle hydrologique à base physique peut ainsi posséder certains modules empiriques par exemple et donc être à la frontière entre deux types de modèle hydrologique (www.fr.wikipedia.org).

Les modèles hydrologiques peuvent être classés :

- selon la nature des variables ;
- selon la spatialisation ;
- selon la représentation des processus ;
- selon la discrétisation temporelle.

2.2. Etat des connaissances

En faisant l'étude comparative de sept méthodes de correction de biais (Delta change, Scaling, EQM, AQM, GQM, GPQM et ISIMIP) appliquées à trois modèles climatiques régionaux (REMO, DMI-HIRHAM5 et RCA4) dans le bassin versant de la Mékrou, Obada et al (2016) ont révélé que seulement trois (03) méthodes de correction (Scaling, EQM et AQM) ont donné

les résultats les plus satisfaisants à différentes échelles de temps (journalière, mensuelle et annuelle).

Sur le bassin de l'Ouémé, M'po et al (2016) ont fait une comparaison des méthodes de correction du biais des précipitations quotidiennes (classées en trois catégories l'approche Delta, la méthode de l'échelle linéaire et les approches quantiles) basé sur les sorties de quatre modèles climatiques régionaux (CCLM, CRCM, RACMO et REMO). Les résultats de cette étude ont permis de conclure que pour la correction des précipitations quotidiennes, les approches par quantile supposant une distribution gamma pour les précipitations quotidiennes n'ont pas permis de réduire les biais des précipitations. La cartographie quantile empirique et la cartographie quantile ajustée sont les plus efficaces pour corriger les biais des précipitations quotidiennes.

Biao (2017) en utilisant le modèle hydrologique basé sur le principe de moindre action ModHyPMA, a montré que le débit fluvial annuel moyen projeté en utilisant HIRHAM5 et RCA4 à Bétérou et Bonou diminue avec une amplitude allant respectivement de 25 % à 39 % et de 20 % à 37 % dans les trois horizons temporels 2020, 2050 et 2080, représentant le début, le milieu et la fin du 21e siècle sous les scénarios RCP4.5. En ce qui concerne la projection future basée sous les scénarios RCP8.5, le débit fluvial moyen annuel projeté en utilisant HIRHAM5 et RCA4 à Bétérou et Bonou diminue avec une amplitude allant respectivement de 15% à 34% et de 18% à 36% dans les trois horizons temporels.

De leur côté, Lawin et al (2018) ont montré que par rapport à la période de référence 2002-2004, le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou connaîtra une augmentation du débit pour tous les horizons temporels jusqu'en 2050 et pour tous les scénarios combinés de changement climatique et d'affectation des terres. Cette augmentation varie de 7,1% à 52% et est exacerbée dans le scénario LUB + RCP4.5.

Hounguè (2020) à travers son étude sur l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrodynamique du delta de l'Ouémé, a fait une projection future des débits du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bonou en vue de quantifier l'impact des activités anthropiques et des changements climatiques sur ceux-ci à l'horizon 2050. Cette projection effectuée révèle que les débits tendent à décroitre significativement selon les références de concentrations représentatives RCP4.5 et une croissance non significative avec les concentrations représentatives RCP8.5

Les travaux de Obada (2017) sur l'approche de quantification des changements récents et futurs de quelques paramètres hydro-climatiques dans le bassin de la Mékrou (Bénin), ont montré que

le scénario RCP4.5 projette pour l'ensemble des cinq modèles hydrologiques (ModHyPMA, HBV, AWBM, SimHyd et TANK) environ 50% d'augmentation des écoulements sur les périodes 2011-2040 et 2071-2100 par rapport à la période de référence 1960-2010 contre environ 20% pour la période de 2041-2071. Selon le scénario RCP8.5, ces accroissements seront d'environ 25% pour les périodes de 2011 à 2040 et 2071 à 2100 contre environ 50% pour la période 2041-2100. Par ailleurs, l'analyse des débits moyens mensuels montre que les changements des écoulements ne résultent pas de la modification du régime hydrologique du bassin mais proviennent plutôt de la variation dans le temps des volumes mensuels écoulés.

Sur la portion du bassin du Niger au Bénin, les précipitations connaitront une tendance à la hausse (1.7 à 23.4%) pour le modèle HIRHAM5 et une variation de -8.5% à 17.3 % avec le modèle RCA4 sous les deux scenarii d'émissions (RCP4.5 et RCP8.5). Par rapport à la période historique 1976-2005, la somme du débit d'écoulement (eau bleue) et la recharge de la nappe connaitront une augmentation uniquement sur le sous bassin de Kompongou pour la période future 2021-2050 d'après Badou, 2016.

Taïbi et al (2021) ont étudié l'Evaluation de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques régionaux CORDEX AFRICA pour la prévision des pluies : cas du bassin côtier oranais. Les méthodes quantile-quantile et Delta ont été utilisées à cet effet. Ils ont montré qu'il y aura une réduction de 12% à 38% des pluies d'ici la fin du 21ème siècle selon le scénario RCP4.5. Selon le scénario pessimiste RCP8.5, cette réduction des pluies est encore plus importante et risque d'affecter la disponibilité des ressources en eau dans la région qui a connu par le passé une période de sècheresse sévère et persistante.

En étudiant l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie), Taibi et al (2021) ont montré que d'après les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5, la disponibilité des eaux superficielles collectées au barrage de Ain Dalia va respectivement diminuer de 5 % à 13 % à l'horizon 2050 et de 21% à 44% à l'horizon 2100.

De l'analyse de ces différents travaux, il ressort que la méthode de correction des biais des MCR n'a pas encore été suffisamment explorée dans le bassin de l'Ouémé en général et plus précisément dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Béterou.

3. But de la recherche

Cette étude vise à utiliser les modèles climatiques régionaux pour la modélisation hydrologique afin de faire une projection des débits du fleuve Ouémé à Bétérou pour les horizons futurs. Elle permettra de connaitre l'impact du changement climatique sur les débits futurs et sera alors un outil de prise de décision.

4. Problème et question de Recherche

Le changement climatique menace les ressources en eau. Face à cette situation, il urge qu'une évaluation de l'impact de ce changement sur les débits futurs du bassin de l'Ouémé à Bétérou soit faite.

Les questions de recherche que suscite le sujet se présentent comme suit :

- La méthode de correction de biais ISIMIP serait-elle efficace dans la correction des biais des MCR de la zone d'étude ?
- Quelle est la capacité des modèles hydrologiques HBV et GR4J dans la reproduction du fonctionnement du bassin de l'Ouémé à Bétérou ?
- Quelle serait l'évolution hydrométrique du bassin l'Ouémé à Bétérou dans les horizons futurs sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ?

5. Objectifs de l'étude

5.1. Objectif général

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'impact du changement climatique sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou.

5.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif principal fixé, trois objectifs spécifiques ont été formulés :

- Évaluer la correction des biais des MCR utilisés par la méthode ISIMIP
- Simuler les débits sur la période de référence (1961 - 1990) avec les modèles HBV et GR4J ;
- Analyser l'évolution future des débits sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Le présent travail sera divisé en deux chapitres précédés d'une introduction générale et suivi d'une conclusion générale et des perspectives. Le chapitre 1 est consacré aux données, matériels et méthode, alors que le chapitre 2 sera consacré aux résultats et à la discussion.

Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes

Introduction

Le présent chapitre aborde dans un premier temps la description de notre milieu d'étude puis dans un second, les données, matériels et les méthodes utilisées.

1.1. Milieu d'étude

1.1.1. Localisation

Long de 510 km le fleuve Ouémé couvre une superficie de 50000 km^2 et prend sa source dans la chaîne de l'Atacora au nord-ouest du Bénin. La présente étude porte sur le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou. Au nord Bénin, Il est situé entre les latitudes 9°12′ Nord à 10°12′ Nord et les longitudes 1°30′ Est à 3° Est et couvre une superficie de 10 076 km^2 (Lawin et al., 2018). Il est partagé par dix (10) communes situées dans trois départements administratifs (Atacora, Borgou, Donga). Les communes de Parakou, Tchaourou, et N'Dali dans le Borgou et les communes de Bassila, Copargo, et Djougou dans la Donga couvrent la majeure partie de ce sous bassin (Ouikotan, 2009).

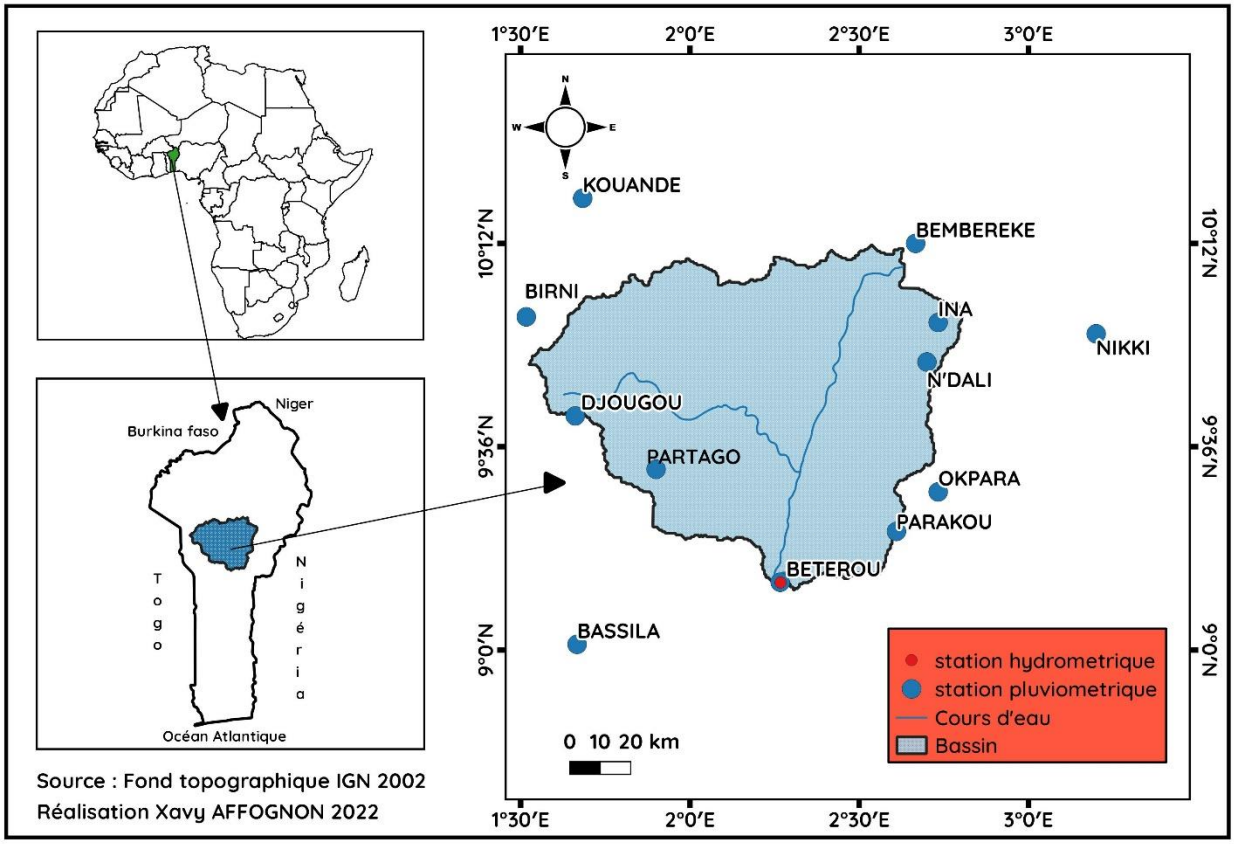


Figure 1 : Carte de localisation du bassin de l'Ouémé à Bétérou

1.1.2. Climat, sol, végétation

Les précipitations sont caractérisées par deux saisons : une saison sèche de novembre à mars et une saison des pluies d'avril à octobre avec un pic de précipitations en août. La moyenne annuelle des précipitations est de 1200 mm/an de 1960 à 2015 (Lawin et al., 2018). Les types de sol retrouvés sont les minéraux bruts, les sols ferrugineux tropicaux, les sols hydromorphes. Quant à la végétation dans le bassin nous avons la savane arborée et abusive, une forêt galerie le long des cours d'eau.

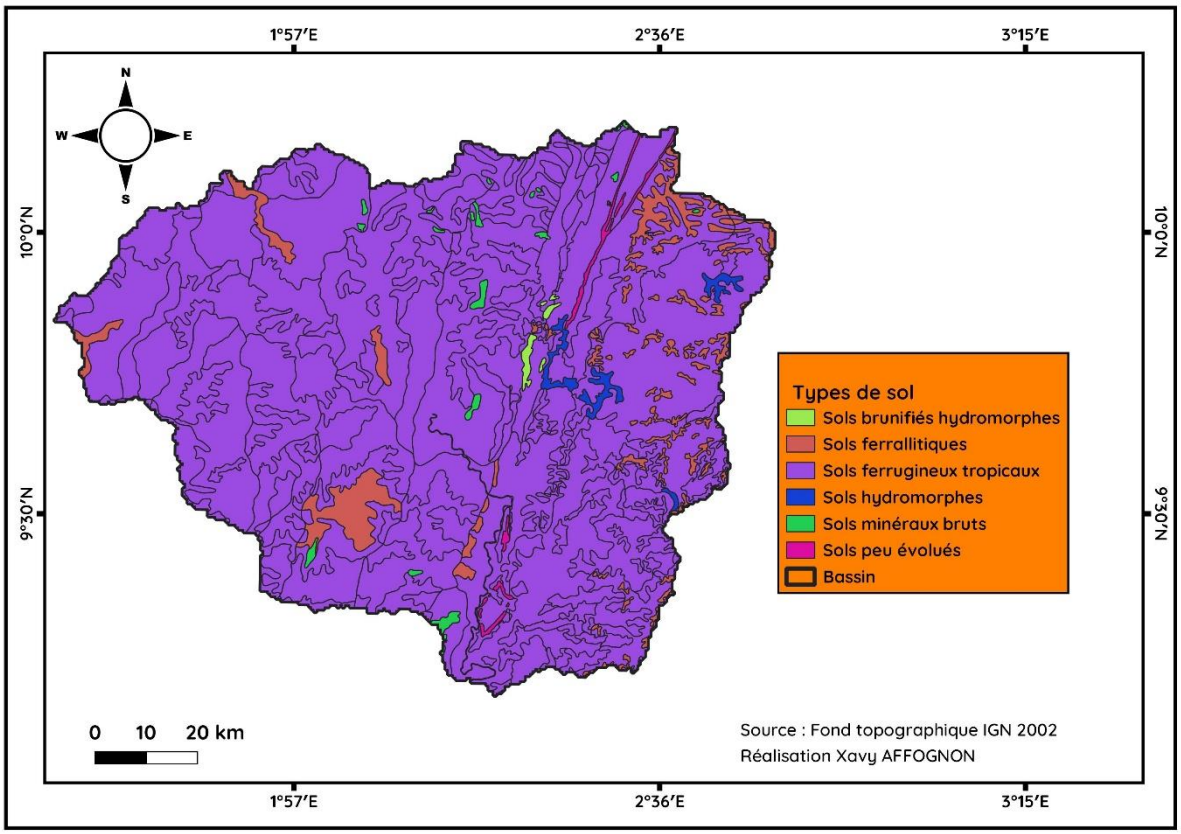


Figure 2 : Carte pédologique du bassin

1.1.3. Géomorphologie, géologie et hydrogéologie

Les principaux types de roches cristallines précambriennes (Dahomeyides) sont les migmatites. Le paysage est une pénéplaine avec des inselbergs isolés. Du point de vue hydrogéologique, la région est caractérisée par un aquifère de fracture rocheuse par le bas et un aquifère régolite par le haut dans sa zone d'altération (Ouikotan, 2009).

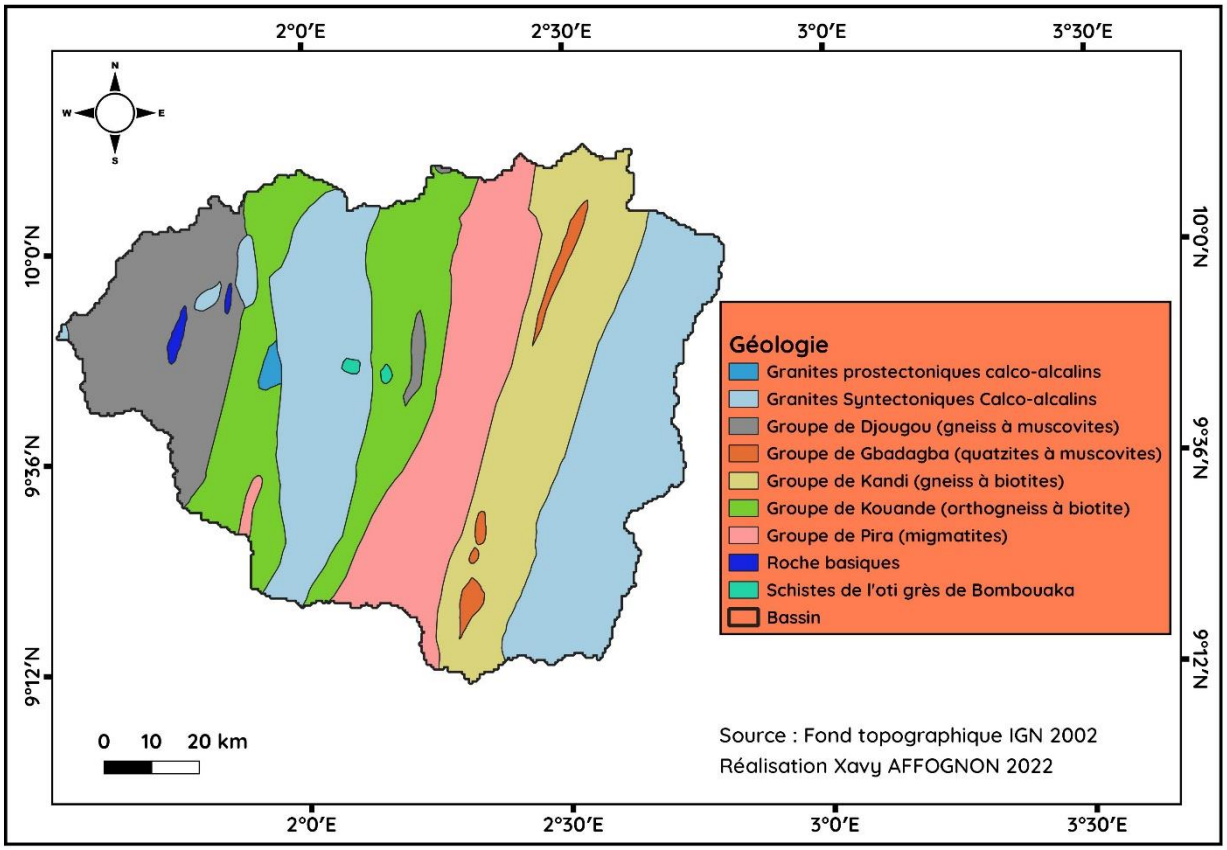


Figure 3 : Carte géologique

1.1.4. Relief et réseau hydrographique

Le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou se caractérise, dans son ensemble, par un relief peu accidenté. Il montre cependant, du sud au nord, plusieurs types de milieux physiques, principalement commandés par un gradient climatique méridien, légèrement modéré par l'altitude (Akognongbe et al., 2014)). Le réseau hydrographique du bassin est dense mais de nombreux cours d'eau ont un débit saisonnier (Lawin et al., 2018).

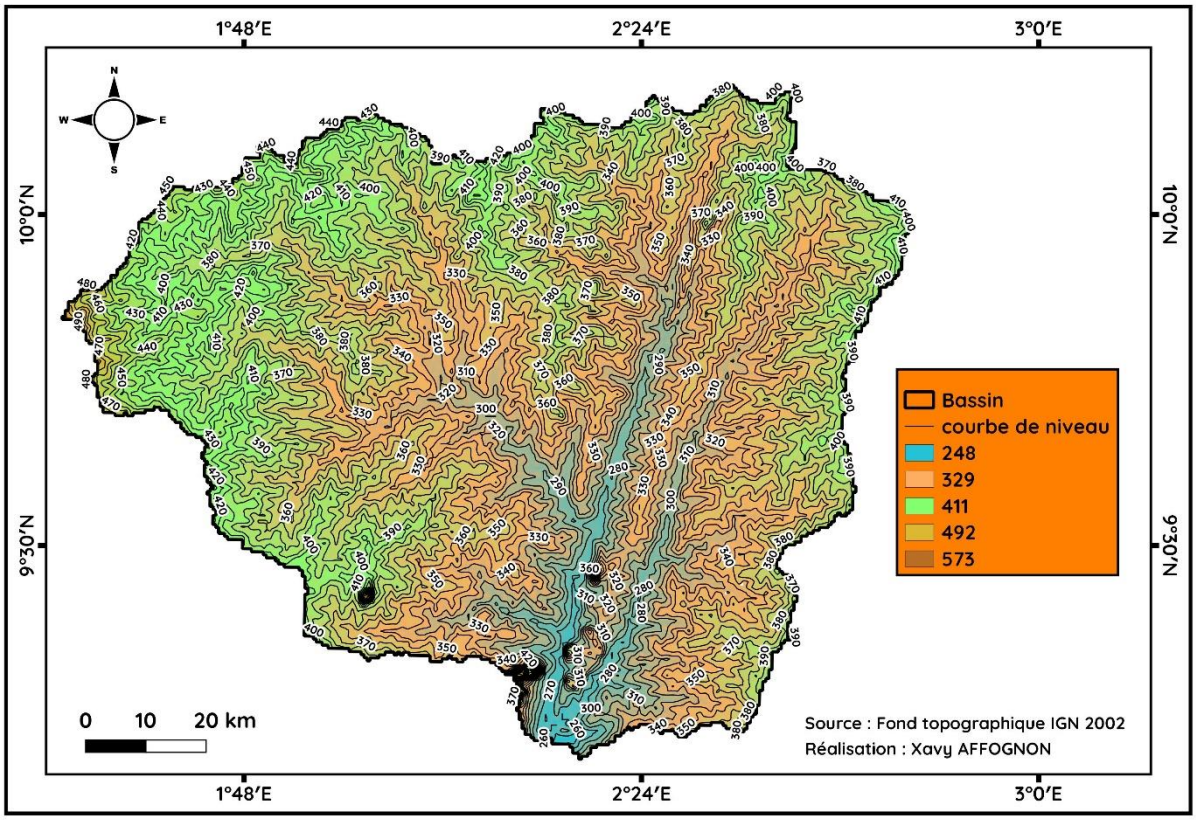


Figure 4 : Relief et les courbes de niveau

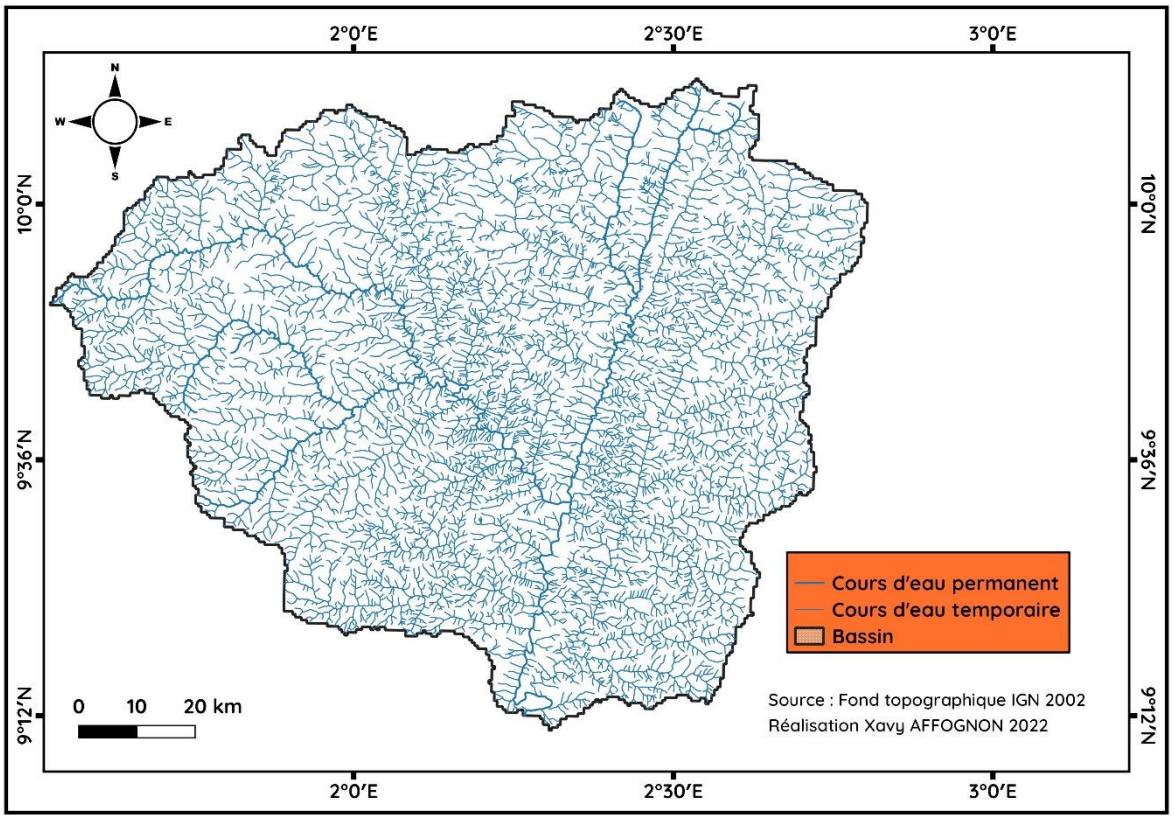


Figure 5 : carte du réseau hydrographique

1.1.5. Démographie des communes du bassin

La population au sein du bassin de l'Ouémé à Bétérou est constituée essentiellement des groupes ethniques comme les Bariba, les Peulhs, les Otamari, les Yoa, les Lokpa, les Dendi, les Nagot, Berba et les Waama et cette population n'a cessé d'évoluer au fil des années avec une augmentation importante de celle-ci. Le tableau 1 présente l'évolution de cette population dans ce bassin.

Tableau 1: Evolution démographique

Commune	**RGPH 3 (2002)**	**RGPH 4 (2013)**
Bassila	71511	130091
Bembereke	94580	131255
Copargo	50820	70938
Djougou	181895	267812
Kouande	80261	111540
N'dali	67379	113604
Parakou	149819	255478
Pehunco	55082	78217
Sinende	63373	91672
Tchaourou	20838	223138
Bassin	**835558**	**1473745**

1.1.6. Activités socio-économiques

Les activités les plus dominantes dans les communes du bassin sont l'agriculture, la pèche, la chasse et le commerce. Le commerce est plus développé à Parakou au détriment des autres activités. L'igname, maïs, le soja, le riz et le sorgho/mil/fonio sont les produits les plus cultivés dans ces communes avec la commune de Copargo qui produise une quantité importante d'igname. Le tableau 2 montre la proportion de la population agricole dans les communes du bassin.

Tableau 2 : Proportion population agricole

Commune	Population	Pop agri	% Pop agri	Ménage	Ménage agri	%Ménage agri
Basilla	130091	86150	66.22	16927	9873	58.36
Bembereke	131255	101094	77.02	15739	10441	66.34
Copargo	70938	59227	83.49	7246	5500	75.90
Djougou	267812	165048	61.63	34039	18673	54.86
Kouande	111540	93347	83.69	13150	9901	75.29
N'dali	113604	87146	76.71	14063	9414	66.94
Parakou	255478	39633	15.51	46181	4447	9.63
Pehunco	78217	62197	79.52	9111	6452	70.82
Sinende	91672	76133	83.05	9398	7031	74.81
Tchaourou	223138	170524	76.42	30121	20303	67.41
Bassin	**1473745**	**940499**	**63.82**	**195975**	**102035**	**52.07**

Source : INSAE, RGPH4, 2013.

1.2. Données utilisées

Pour cette étude les données utilisées sont constituées de:

- Données d'observation : Pluie, évapotranspiration potentielle (ETP) et de débits journaliers sur la période 1961- 1990 obtenues à Météo-Bénin et à DG-Eau ;
- Données des Modèles Climatiques Régionaux (HIRHAM5, REMO, RCA4) sur la période historique (1961 - 2005) et sur la période future (2006 - 2100) sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Ces données sont extraites de la base de données de CORDEX-AFRICA.

1.3. Matériels

Pour cette étude, le modèle HBV light, Le modèle GR4J d'après Perrin et al, 2003 exécutable sur la feuille de calcul Excel ont permis de faire la modélisation hydrologique. R studio 3.6 a été utilisé pour le traitement. Quant à la réalisation des graphes et des cartes cela a été possible respectivement grâce à la feuille de calcul Excel 2016 et du logiciel QGIS 3.4. Enfin, la rédaction a été faite dans Word 2016.

1.4. Méthodes

1.4.1. Contrôle de la qualité des données

- ✓ **Correction des biais des MCR**

1.4.1.1. Présentation de la méthode de correction de biais ISIMIP

ISIMIP est une méthode proposée par Hempel et *al.* (2013) qui est une nouvelle méthode de correction de biais développée dans le cadre du projet ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project) financé par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche. Cette méthode a été développée pour préserver l'évolution du signal (tendance, signal de changement climatique, etc.) et peut être appliquée à plusieurs variables (précipitation, température moyenne, température maximale et minimale, rayonnement, pression et humidité).

Pour la correction des données moyennes mensuelles, les formules suivantes sont utilisées :

- Température : $T_{ij}^{\sim MCG} = C + T_{ij}^{MCG}$ (1) avec $C = \frac{\sum_{I=1}^{m=40} Ti^{WFD} - \sum_{I=1}^{m=40} Ti^{MCG}}{40}$ (2)
- Précipitation : $P_{ij}^{\sim MCG} = C * P_{ij}^{MCG}$ (3) avec $C = \frac{\sum_{I=1}^{m=40} Pi^{WFD}}{\sum_{I=1}^{m=40} Pi^{MCG}}$ (4)

Dans les formules ci-dessus i représente l'année, j le jour et WFD donnée de forçage du projet WATCH (Eau et Changement climatique)

- ✓ **Variabilité pluviométrique des MCR sur le bassin**

Une comparaison entre les données d'observation de pluie, les MCR non corrigés et les MCR corrigés est faite pour voir si les MCR corrigés arrivent à reproduire le régime pluviométrique du bassin.

1.4.1.2. Critères de performance

Pour mieux évaluer les corrections effectuées sur les MCR, des critères de performance ont été appliqués.

Dans les formules ci-dessous, $Q_{obsi,}$ $Q_{simi,}$ et n representent respectivement les débits journaliers observés, les débits journaliers simulés au jour i et le nombre total de jours.

- ✓ **Erreur quadratique moyenne ($MRSE$)**

$$MRSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi - Qsimi)^2}{n}} \qquad (5)$$

L'écart quadratique moyen, entre deux séries, représente la distance entre les moyennes de ces deux séries. Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure.

- ✓ **L'écart moyen absolu (MAE)**

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|(Qobsi - Qsimi)| \qquad (6)$$

L'écart moyen absolu est la moyenne des écarts en valeur absolue entre les données des deux séries prises deux à deux. Elle est d'autant plus proche de zéro que les deux séries considérées sont similaires.

1.4.2. Modélisation hydrologique du bassin

Parfois, des limitations telles que la quantité et le type de données disponibles constituent un critère d'orientation vers des types de modèles précis. Dans le cadre de cette étude dont la disponibilité de données suffisantes fait défaut, on se limite aux modèles globaux. En se basant sur les critères ci-dessous :

– les mêmes types de données de forçage pour tous les modèles ;

– l'adéquation entre les données de forçage du modèle et les données disponibles ;

– la performance du modèle dans les applications antérieures ;

– le nombre réduit de paramètres du modèle (Obada, 2017), deux (2) modèles hydrologiques (HBV et GR4J) ont été sélectionnés.

1.4.2.1. Présentation des modèles

- ➢ **HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)**

Le modèle HBV a été élaboré par Bergstrom (1992, 1995) à l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie. Ce modèle conceptuel de bassin versant convertit les données sur les précipitations, la température de l'air et l'évapotranspiration potentielle en valeurs de la fonte nivale (le cas échéant) et en valeurs de l'écoulement fluvial et/ou du débit entrant dans les réservoirs. Ayant été modifié à maintes reprises, il en existe des variantes dans un certain nombre de pays. Le modèle décrit le bilan hydrologique général de la façon suivante:

$$P - E - Q = d/dt\,[SP + SM + UZ + LZ + VL] \qquad (7)$$

où P désigne les précipitations, E l'évapotranspiration, Q l'écoulement, SP le manteau neigeux, SM l'humidité du sol, UZ la zone supérieure des eaux souterraines, LZ la zone inférieure des

eaux souterraines et VL le volume des lacs. Le modèle HBV peut être considéré comme un modèle semi-distribué permettant de diviser le bassin versant en sous-bassins et de créer des zones d'altitude. Il comprend des sous-programmes pour l'interpolation météorologique, l'accumulation et la fonte de neige, l'évapotranspiration, le calcul de l'humidité du sol, la formation de l'écoulement et, enfin, la propagation par les cours d'eau et les lacs. La figure 6 ci-dessous illustre le fonctionnement du modèle.

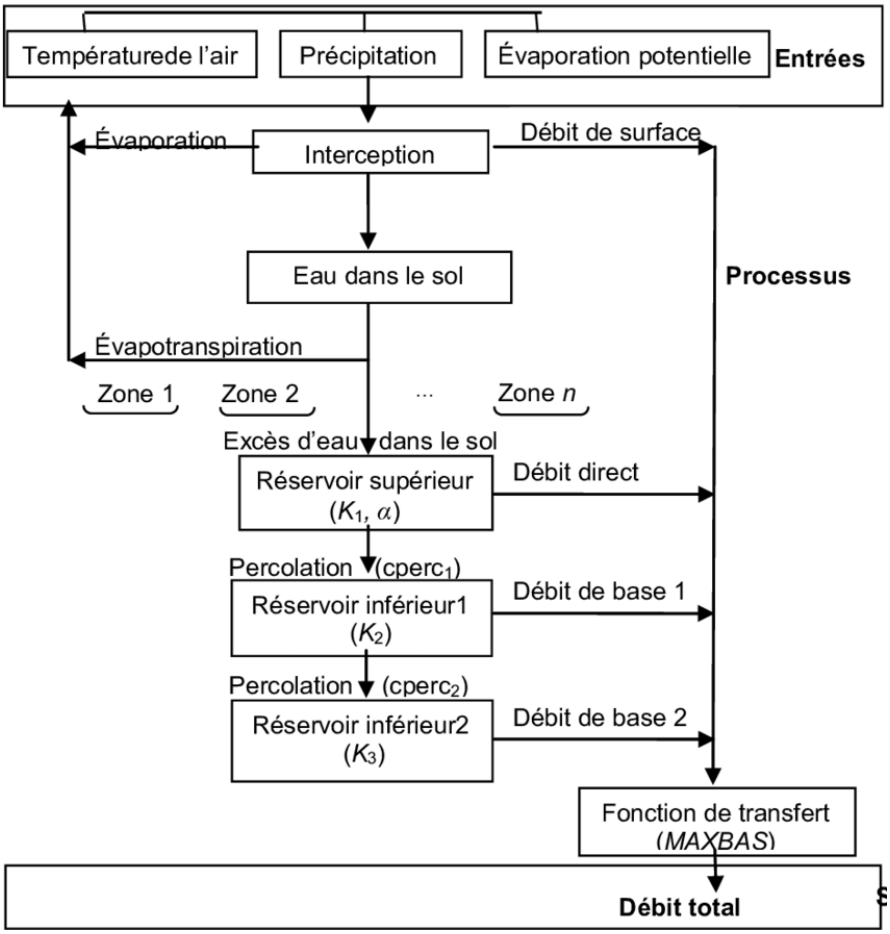


Figure 6 : Structure du modèle HBV

- **Le modèle GR4J**

Le modèle GR4J tourne au pas de temps journalier et prend en entrées également la pluie et l'ETP. Il utilise quatre paramètres qui sont la capacité du réservoir de production (niveau d'eau dans les premiers horizons du sol qui gère le bilan d'eau dans le sol) dont le remplissage est fonction de la nature du sol ; le paramètre d'échange (gain ou perte) qui permet de prendre en compte les erreurs dues au forçage climatique (P et ETR) ; la vitesse de vidange du réservoir de routage (eau souterraine qui alimenterait le cours d'eau à l'exutoire avec un effet retard) et le temps de base (maximal) de l'hydrogramme unitaire.

La figure 7 illustre le fonctionnement du modèle.

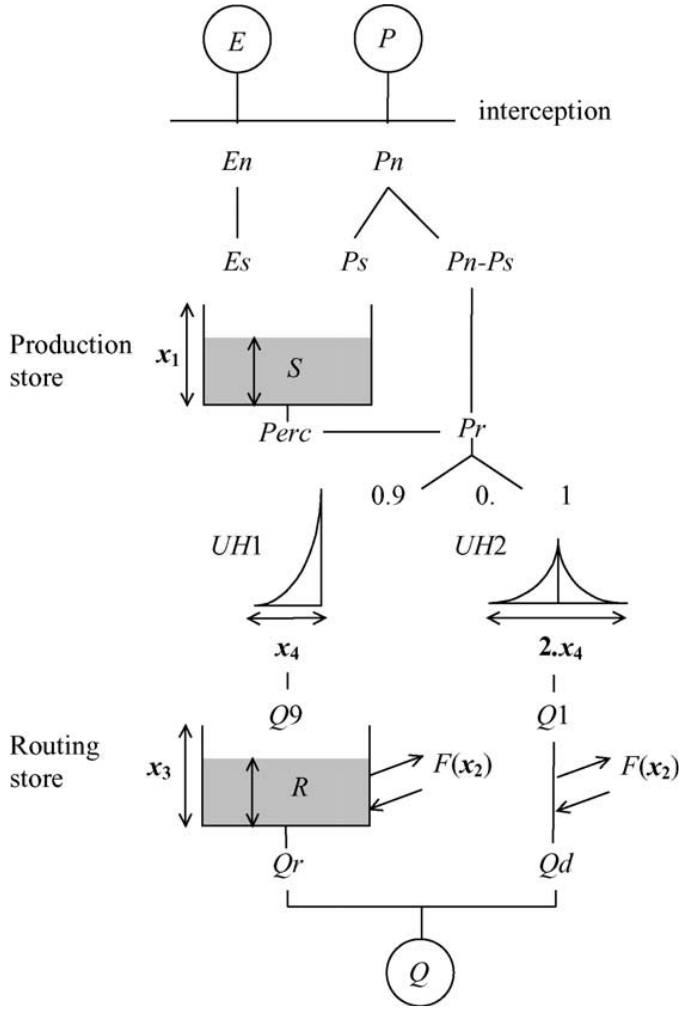


Figure 7 : fonctionnement du modèle GR4J (d'après Perrin et al., 2003)

- 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 (jours)

Le calage et la validation ont été respectivement faits sur la période 1961 – 1980 et 1981-1990. Cela a permis de simuler les débits et d'apprécier la capacité des deux modèles hydrologiques à reproduire le régime hydrologique du bassin.

1.4.2.2. Critères d'évaluation de performance

Dans les formules ci-dessous, $Q_{obsi,}$ $Q_{simi,}$ et n representent respectivement les débits journaliers observés, les débits journaliers simulés au jour i et le nombre total de jours.

- ✓ **Le critère de Nash-Sutcliffe (ou critère de Nash)**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi - Qsimi)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Qobsi - \overleftarrow{Qobsı}\right)^2} \qquad (8)$$

IL varie entre [−∞ ; 1]. Si la valeur du critère est 1 le modèle est parfait par contre si la valeur est inférieure à zéro ça veut dire que le modèle n'explique pas mieux le comportement du bassin.

- ✓ **Le coefficient de détermination R^2**

$$r^2 = \frac{\{\sum_{i=1}^{n}(Qobsi - \overleftarrow{Qobı})(Qsimi - \overleftarrow{Qsımı})\}^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Qobsi - \overleftarrow{Qobı}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(Qsimi - \overleftarrow{Qsımı}\right)^2} \qquad (9)$$

Il est compris entre 0 et 1, et décrit combien de fois la distribution des débits simulés concorde avec ceux observés. Une valeur zéro décrit qu'il n'y a aucune corrélation alors que la valeur 1 décrit que la dispersion des débits simulés est égale à ceux observés.

- ✓ **Pourcentage absolu de biais (APB)**

$$APB = \frac{|\sum_{i=1}^{n} Qsimi - \sum_{i=1}^{n} Qobsi|}{\sum_{i=1}^{n} Qobs\, i} * 100 \qquad (10)$$

Ce critère permet de quantifier le biais entre les débits simulés et ceux observés.

1.4.3. Analyse de l'évolution future des débits par rapport à la période de référence

La simulation des débits futurs des MCR a été faite avec les deux (2) modèles hydrologiques (HBV et GR4J) et sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur trois (3) sous périodes à savoir : 2011-2040 (début du siècle), 2041-2070 (milieu du siècle) et 2071-2100 (fin du siècle).

La quantification des changements futurs par rapport à la période de référence est évaluée par la formule suivante :

$$Q\ changement(\%) = \frac{Qfuture - Qréférence}{Qréférence} * 100 \qquad (11)$$

Conclusion

Ce chapitre présente le milieu d'étude qui est situé dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou au nord Bénin. Il couvre dix communes. Il est caractérisé par un climat unimodal, un relief peu accidenté dans l'ensemble avec un réseau hydrographique dense ayant des cours d'eau de débit saisonnier. La population du bassin est très importante, exerçant plus l'agriculture, la pèche, la chasse, et le commerce. Ce chapitre présente aussi les données, matériels et les méthodes utilisés pour pouvoir effectuer ce travail.

Chapitre 2 : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Le présent chapitre présente les résultats et la discussion. Il met en exergue l'évaluation de la correction des biais des MCR, la capacité des modèles HBV et GR4J à reproduire le fonctionnement du bassin de l'Ouémé à Bétérou et la projection des débits futurs avec les données des MCR.

2.1. Résultats

2.1.1. Evaluation de la correction des biais des MCR

La figure 8 présente la comparaison effectuée entre les pluies moyennes observées et les MCR non corrigés. L'analyse de cette figure montre que les MCR non corrigés n'arrivent pas à bien reproduire les précipitations mensuelles dans le bassin par rapport aux observations principalement en raison de leurs différents schémas dynamiques et paramétrages physiques de la mousson ouest-africain (Paeth et al., 2011; Biao, 2017). Elle montre aussi que le modèle HIRHAM5 surestime les pluie moyennes observées du 3ème au 5ème mois et du 8ème au 11ème mois de l'année. Le modèle RCA4 quant à lui surestime ces dernières du 3ème au 6ème mois. Au niveau du modèle REMO, les pluies moyennes observées sont surestimées du 5ème au 11^{èmek} mois de l'année.

L'application de la méthode ISIMP pour la correction des bais des données pluviométriques simulées des MCR montre que les MCR corrigés arrivent à reproduire au mieux les pluies moyennes observées (figure 9). Afin de mieux apprécier la correction effectuée, des critères de performance comme l'erreur quadratique moyenne (MRSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) ont été appliqués. Le tableau 3 présente les résultats de cette application. L'analyse de ce tableau révèle une diminution de MAE des données pluviométriques simulées non corrigées de tous les MCR et la diminution de MRSE des données pluviométriques simulées non corrigées de HIRHAM5, RCA4 à l'exception de REMO

La comparaison faite entre les MCR corrigés et les pluie moyennes observées (figure 10) pour pouvoir dégager le MCR qui représente au mieux les pluies moyennes observées sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou démontre que le modèle climatique HIRHAM5 améliore au mieux la qualité des précipitations.

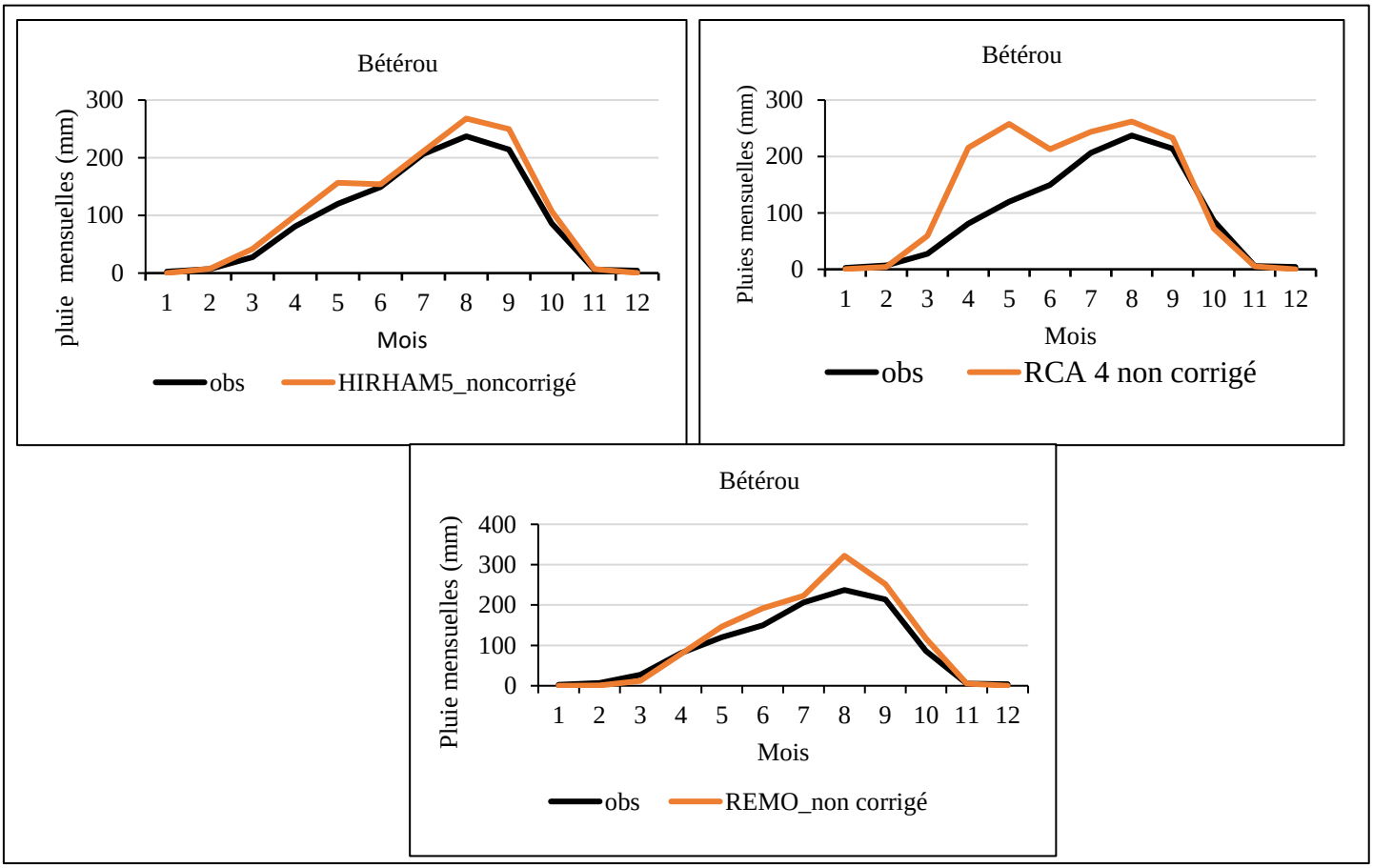


Figure 8 : Comparaison entre les pluies moyennes observées et les MCR non corrigés

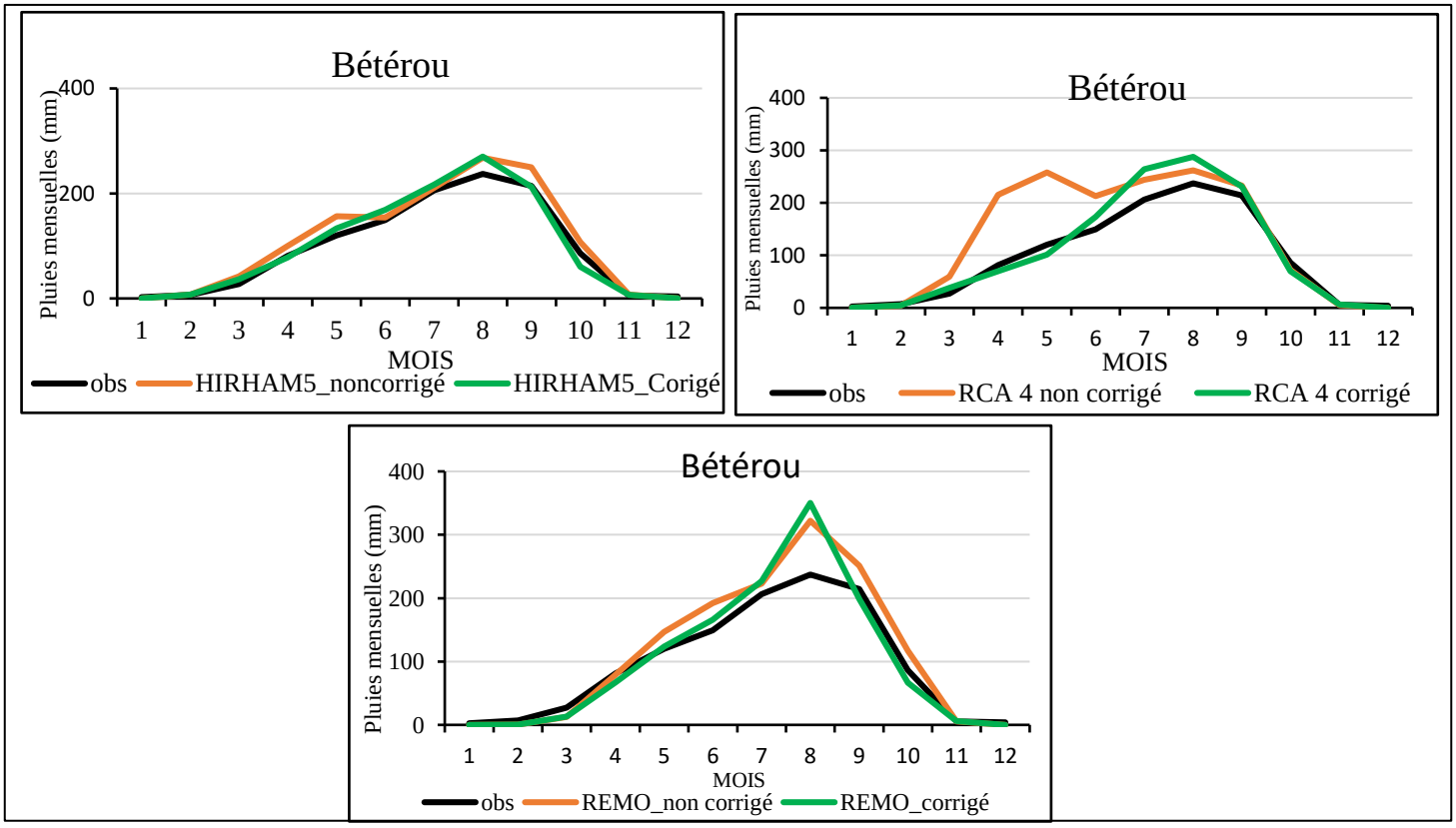


Figure 9 : Comparaison entre les pluies moyennes observées, MCR non corrigés et MCR corrigés

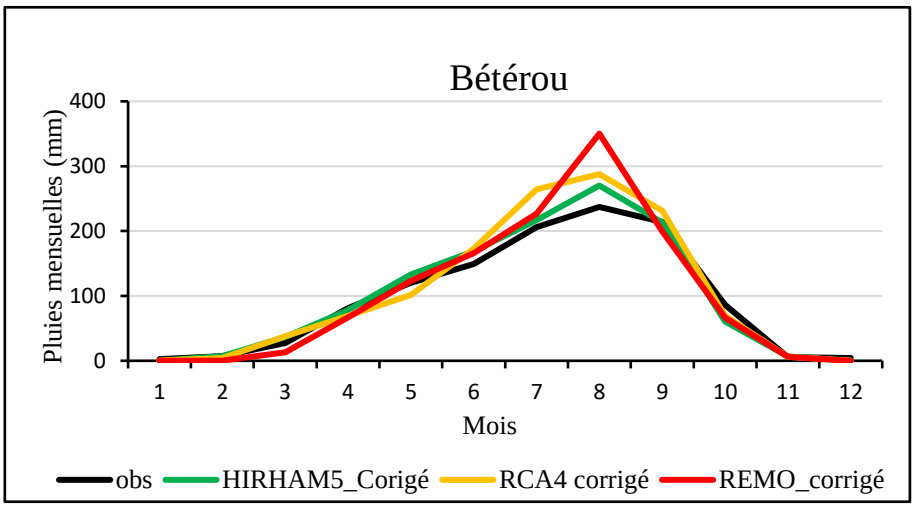


Figure 10 : Comparaison entre les MCR Corrigés

Tableau 3 : critères d'évaluation de performance

Critères	HIRHAM5 non corrigé	RCA4 non corrigé	REMO non corrigé	**HIRHAM5 corrigé**	**RCA4 corrigé**	**REMO corrigé**
MRSE	19.57	61.05	32.48	14.56	25.32	34.85
MAE	14.50	39.38	22.49	10.30	18.05	19.20

Les résultats obtenus ci-dessus nous permettent de dire que la méthode de correction de biais ISIMIP est efficace dans la correction des biais des MCR (HIRHAM5, RCA4 et REMO) vis à vis des précipitations observées sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

2.1.2. Evaluation des performances des deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J) sur la période de référence 1961-1990

Pour mieux évaluer la performance des modèles hydrologiques de l'étude à reproduire le fonctionnement du bassin, des simulations des débits ont été effectuées sur la période de référence 1961-1990.

2.1.2.1. Performance des modèles à long terme

Les modèles ont été calés sur la période 1961-1980 et validés sur la période 1981-1990. L'analyse des hydrogrammes (figures 11 et 12) montre que les deux modèles simulent bien les débits observés. Néanmoins on remarque des écarts et des pics (1982,1983 et 1986 en validation) qui ont été négligés. Pour pouvoir mieux appréhender la performance des modèles les critères de performance comme le critère de Nash (NSE), le coefficient de détermination R^2 et le pourcentage absolu de biais (APB) ont été utilisés. Le tableau 4 rend compte de la

performance des deux modèles en calage et en validation. L'analyse de ce dernier montre que les deux modèles présentent de meilleurs résultats que ce soit en calage qu'en validation. En effet, les critères NSE et R^2 varient respectivement 0.72 à 0.78 et 0.82 à 0.87. Quant au APB, nous avons une variation de 26.17 à 48.43.

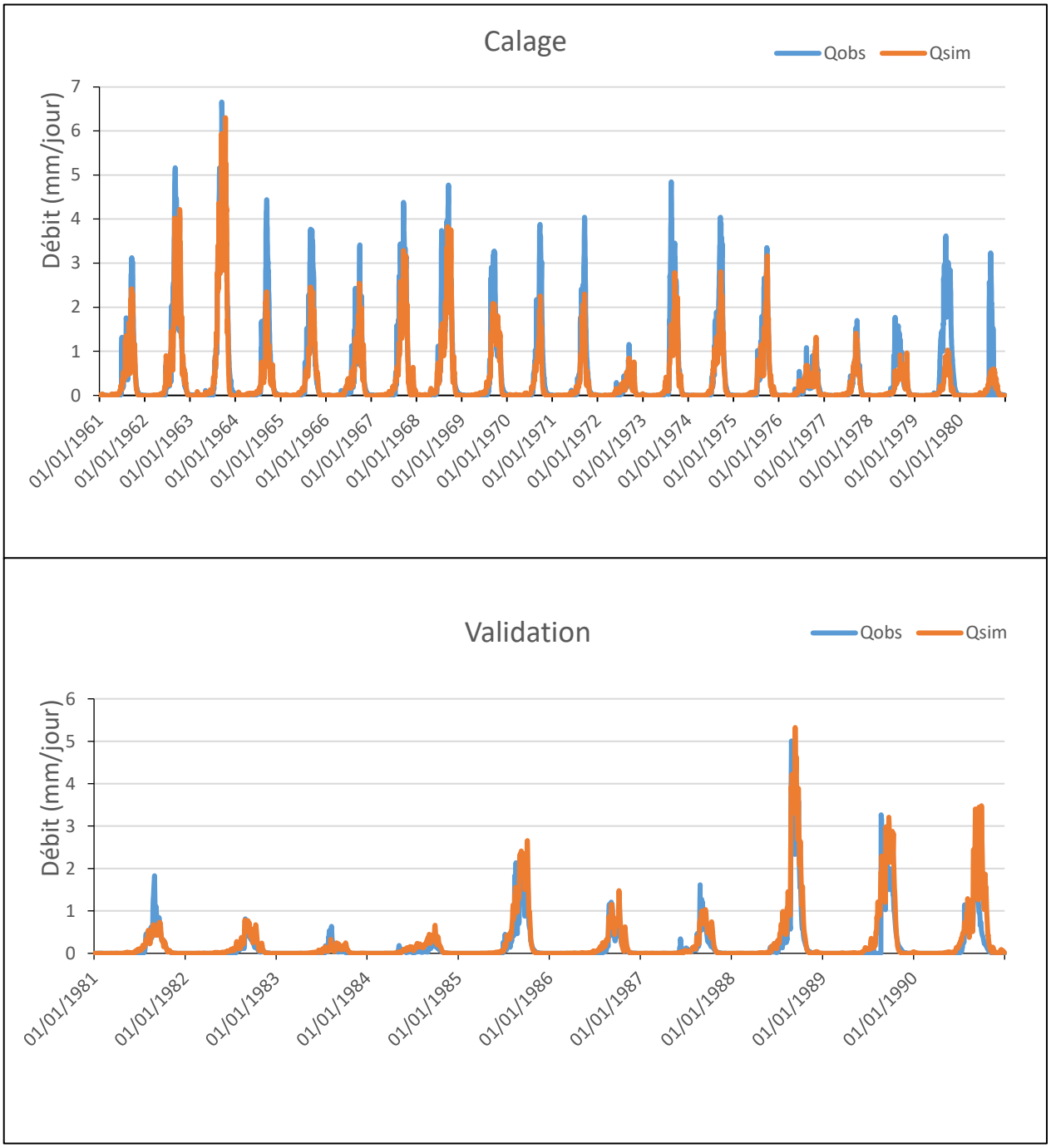


Figure 11 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés par HBV en calage et validation.

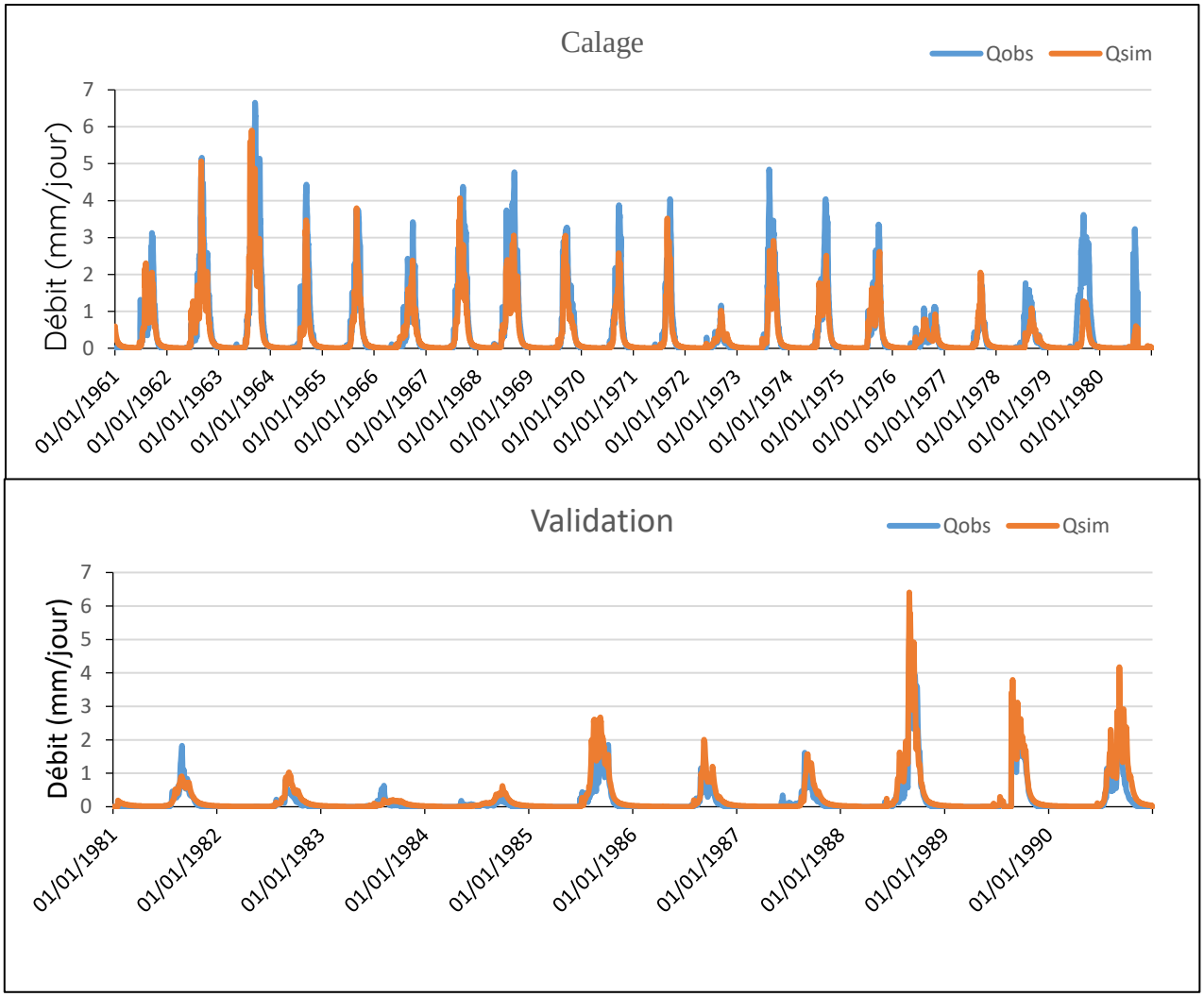


Figure 12 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés par GR4J en calage et validation

Tableau 4 : Performance des modèles sur le long terme

		NSE	R^2	APB
HBV	Calage	0.78	0.82	26.17
	Validation	0.70	0.84	43.96
GR4J	Calage	0.74	0.82	29.16
	Validation	0.72	0.87	48.43

Le tableau 4 révèle des valeurs de NSE supérieures à 0.65. Une valeur de NSE supérieure à 0,65 permet de dire que la performance d'un modèle hydrologique est bonne (Bakayoko et al., 2020). On conclure donc que les deux modèles sont performants dans la simulation des écoulements du bassin de l'Ouémé à Bétérou.

2.1.2.2. Performance des modèles à court terme

Le calage (1962 – 1966) et la validation (1982 – 1986) des débits effectués afin de mieux voir le comportement des débits simulés chaque année révèle avec l'analyse des figures 13 et 14 que les deux modèles reproduisent bien les débits observés surtout avec le modèle HBV. On observe quelques décalages en calage (1962,1963 et 1964) qui pourraient être attribués au temps de réponse du bassin versant aux évènement pluvieux (Kodja, 2018). Notons également que des pics des années 1983 et 1984 en validation n'ont pas été bien reproduire par les deux modèles. Le tableau 5 des critères d'évaluation des performances démontre que le NSE et R^2 varient respectivement de 0.75 à 0.81 et de 0.85 à 0.87 alors que l'APB est de 25.62 à 40.62.

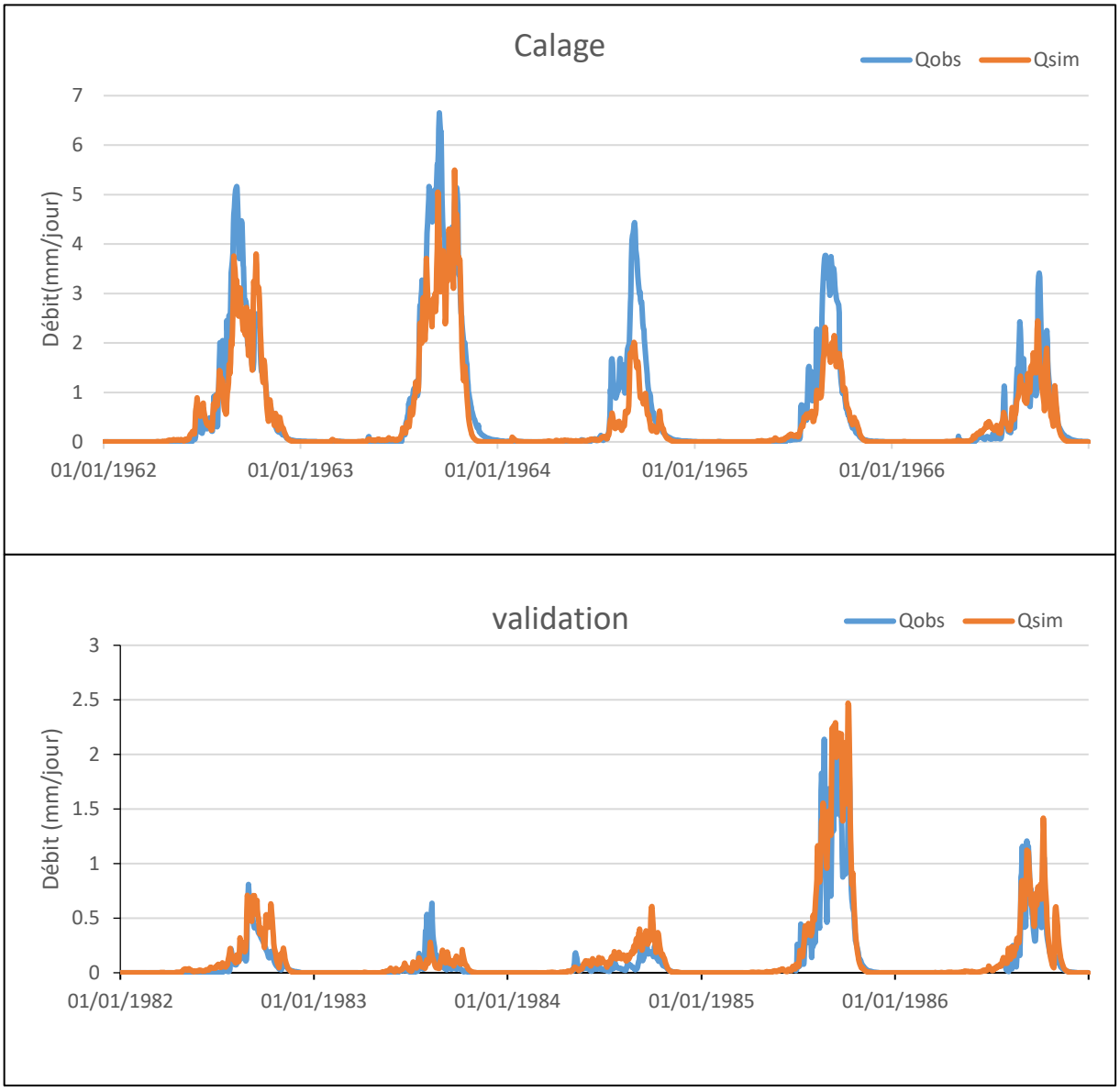


Figure 13 : Hydrogrammes des débits observés et simulés par HBV en calage et en validation à court terme.

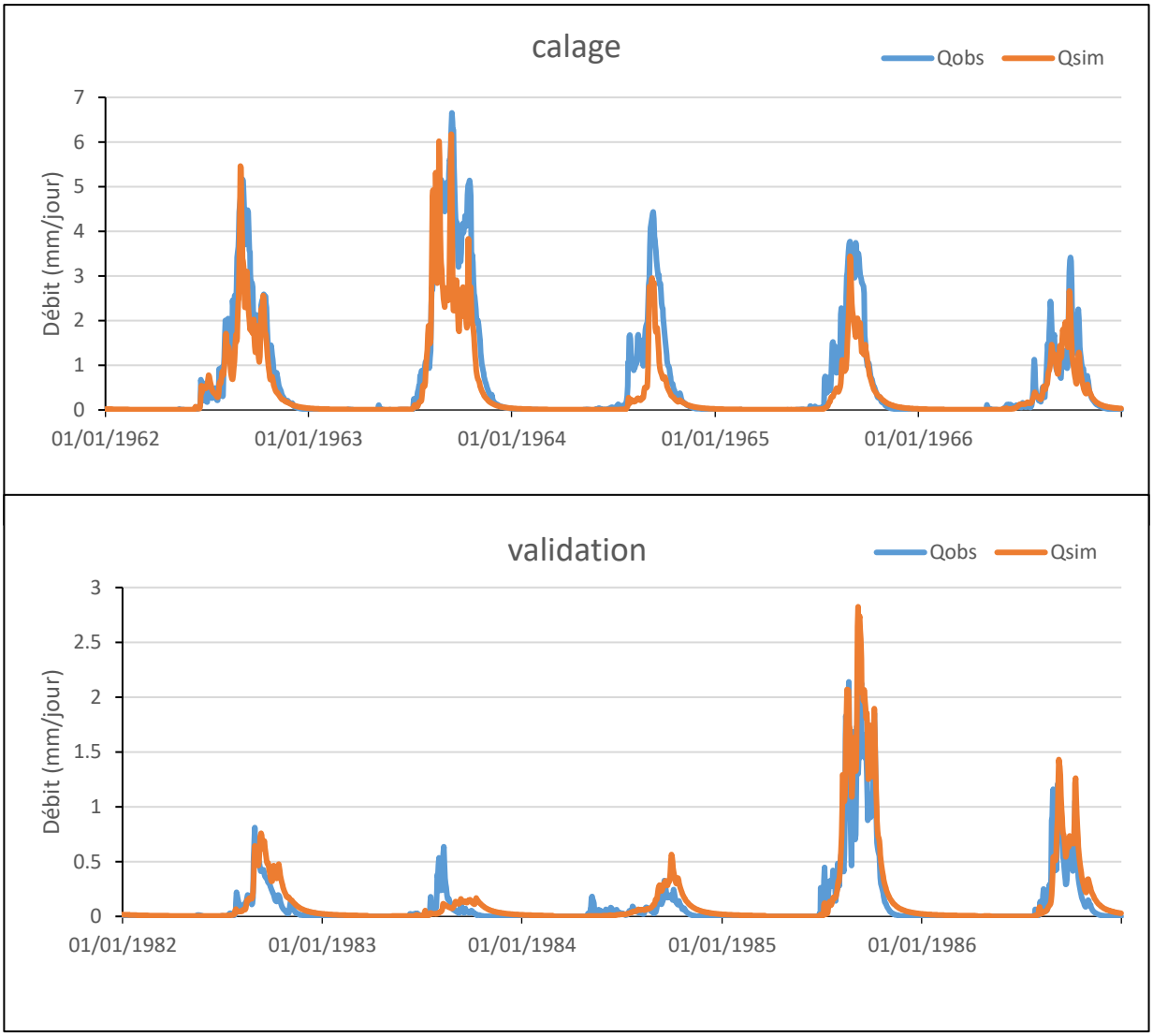


Figure 14 : Hydrogrammes des débits observés et simulés par GR4J en calage et en validation à court terme

Tableau 5 : Performance des modèles à court terme.

		NSE	R^2	APB
HBV	Calage	0.81	0.87	25.62
	Validation	0.77	0.87	40.62
GR4J	Calage	0.77	0.85	32.51
	Validation	0.75	0.88	36.14

2.1.2.3. Performance des modèles à simuler les débits moyens annuels

Le calage (1961 – 1980) et la validation (1981 – 1990) des débits moyens annuels montre après analyse des hydrogrammes (figures 15 et 16) que les débits simulés sous-estiment les débits observés en calage mais surestiment ces derniers en validation au niveau des deux modèles. Le tableau 6 présente la performance des deux modèles en calage et en validation afin de mieux apprécier les écarts. L'analyse de ce dernier montre que les deux modèles présentent de très bons résultats que ce soit en calage qu'en validation. En effet, les critères NSE et R^2 varient respectivement 0.74 à 0.84 et 0.90 à 0.99. Pour ce qui est de l'APB nous avons une variation de 32.42 à 38.31.

.

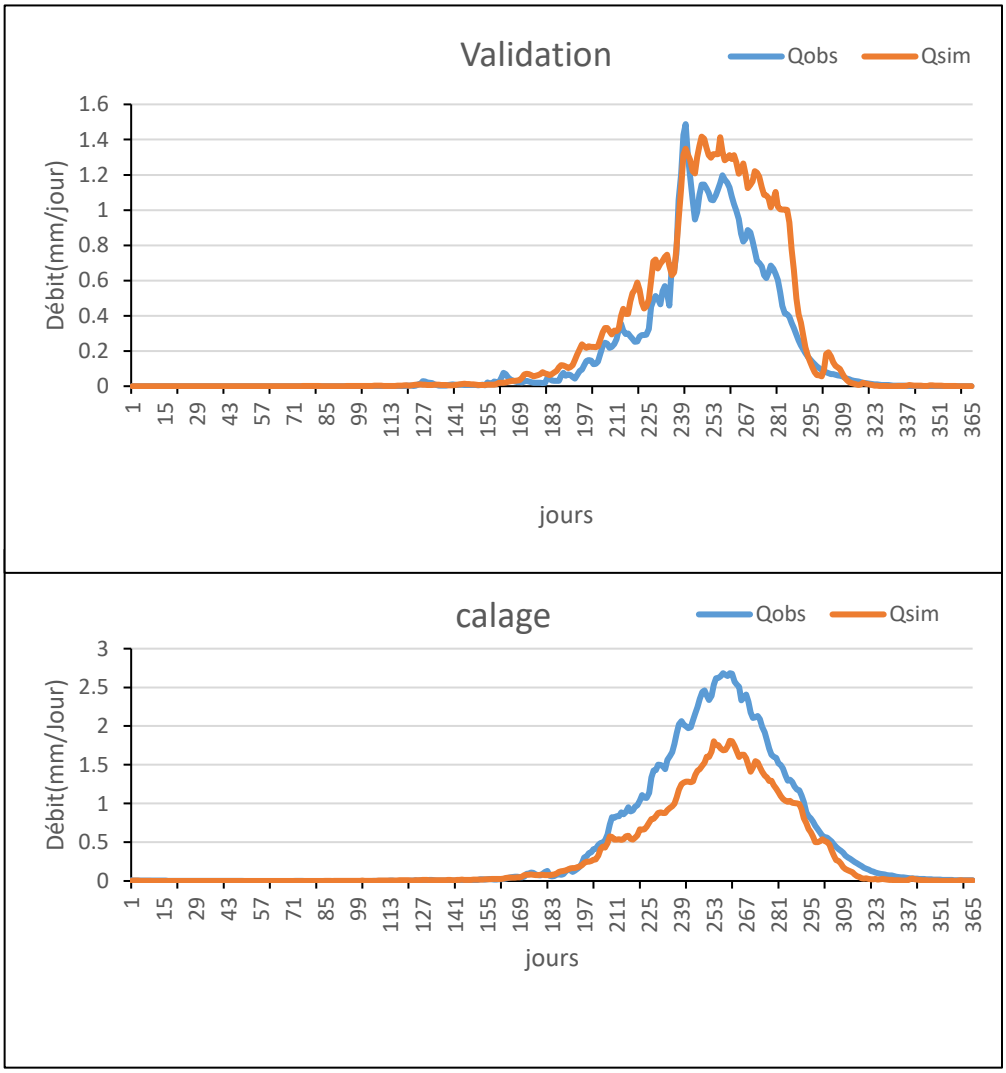


Figure 15 : Hydrogrammes des débits moyens annuels observés et simulés par HBV en calage et validation.

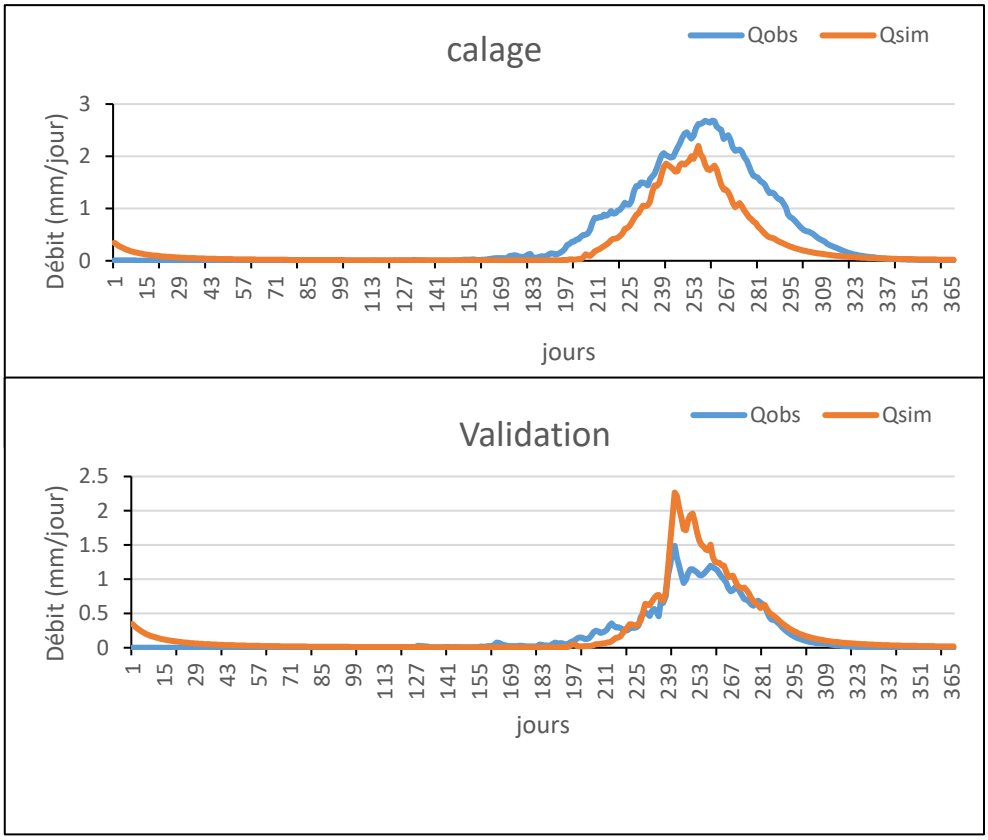


Figure 16 : Hydrogrammes des débits moyens annuels observés et simulés par GR4J en calage et validation

Tableau 6 : Performance des modèles avec les débits moyens annuels

		NSE	R^2	APB
HBV	Calage	0.84	0.99	32.45
	Validation	0.82	0.94	34.64
GR4J	Calage	0.78	0.90	38.61
	Validation	0.74	0.92	32.42

Avec ces résultats obtenus on peut dire que les deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J) simulent bien les débits du bassin avec les débits moyens annuels et peuvent servir à la projection des débits futurs.

2.1.3. Analyse de l'évolution future des débits sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Les données de précipitations des MCR corrigés et de ETP ont servi à simuler les débits futurs avec les deux modèles. L'analyse de l'évolution future des débits a été effectuée sur trois sous

période à savoir : 2020s (2011-2040) représentant le début du siècle, 2050s (2041-2070) le milieu du siècle et 2080s (2071-2100) qui représente la fin du siècle. Les figures (17, 18, 19 et 20) montrent l'évolution des débits annuels moyens simulés à partir de chaque modèle climatique régional par rapport aux débits de référence sous les trois horizons. L'analyse de ces hydrogrammes montre une alternance (soit une augmentation ou une diminution) des débits issus de chaque modèle climatique par rapport à la période de référence suivant les différents horizons sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) avec les deux modèles hydrologiques.

- **Sous le scénario RCP4.5**

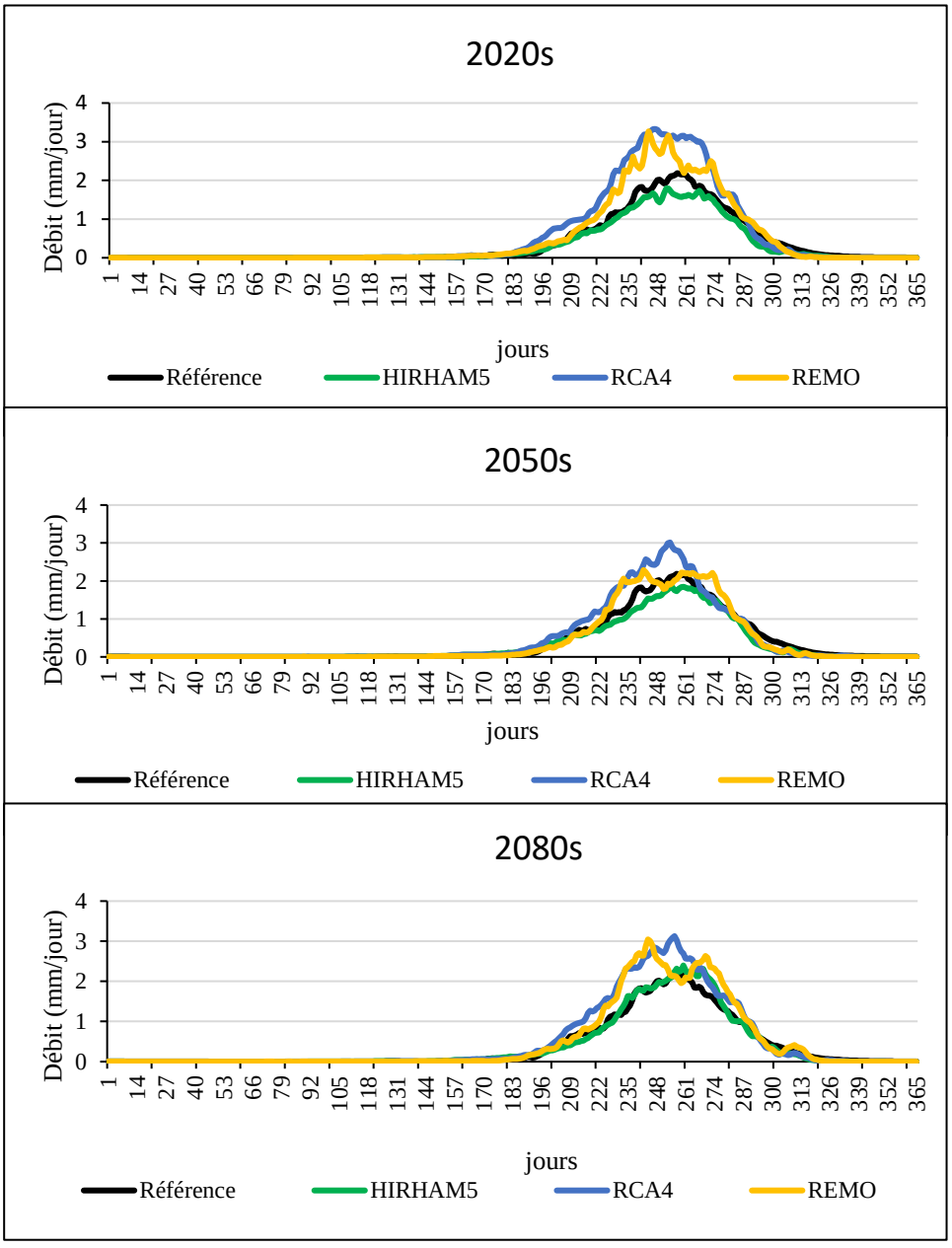


Figure 17 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP4.5 par HBV

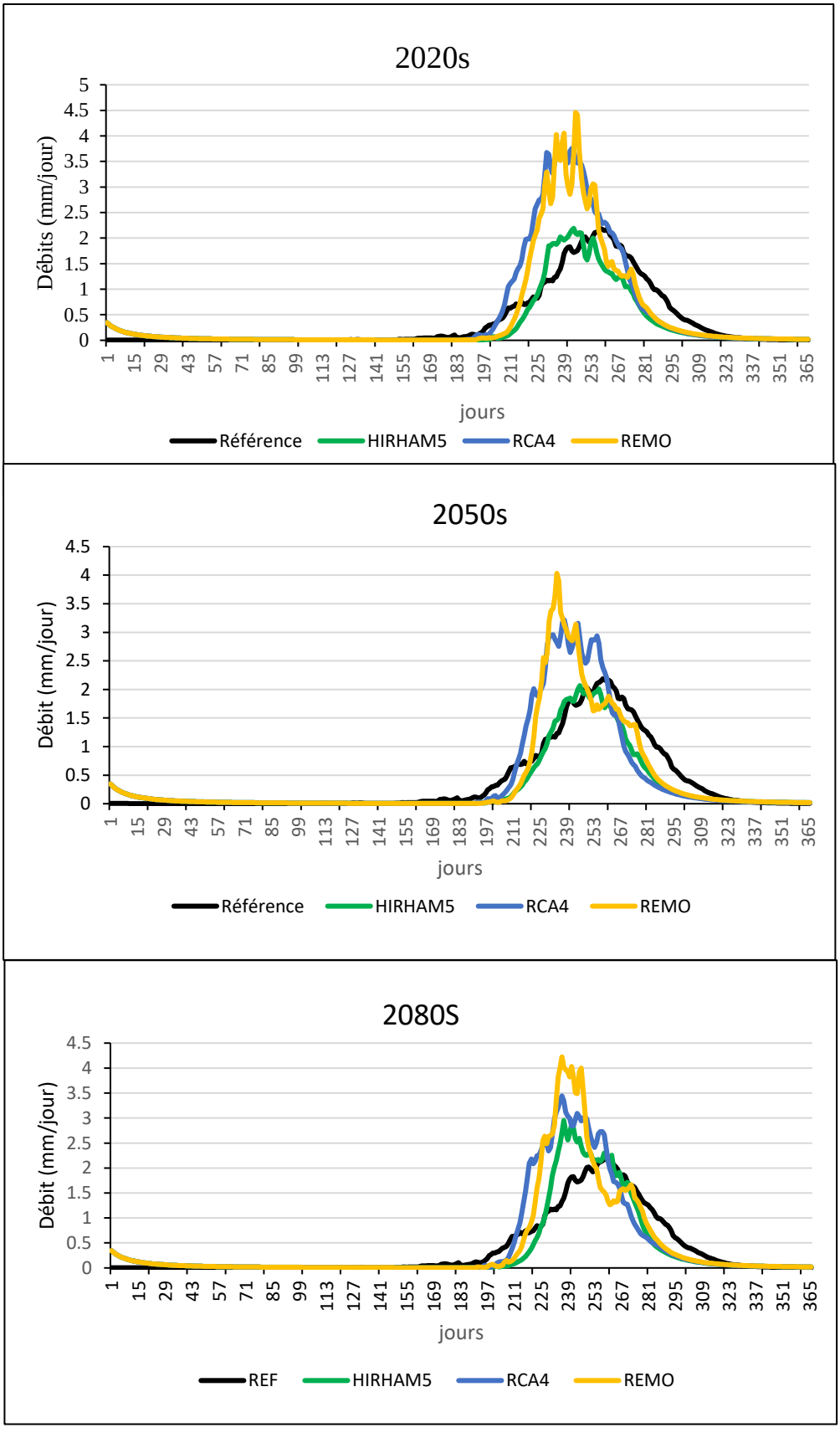


Figure 18 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP4.5 par GR4J

➢ **Sous le scénario RCP8.5**

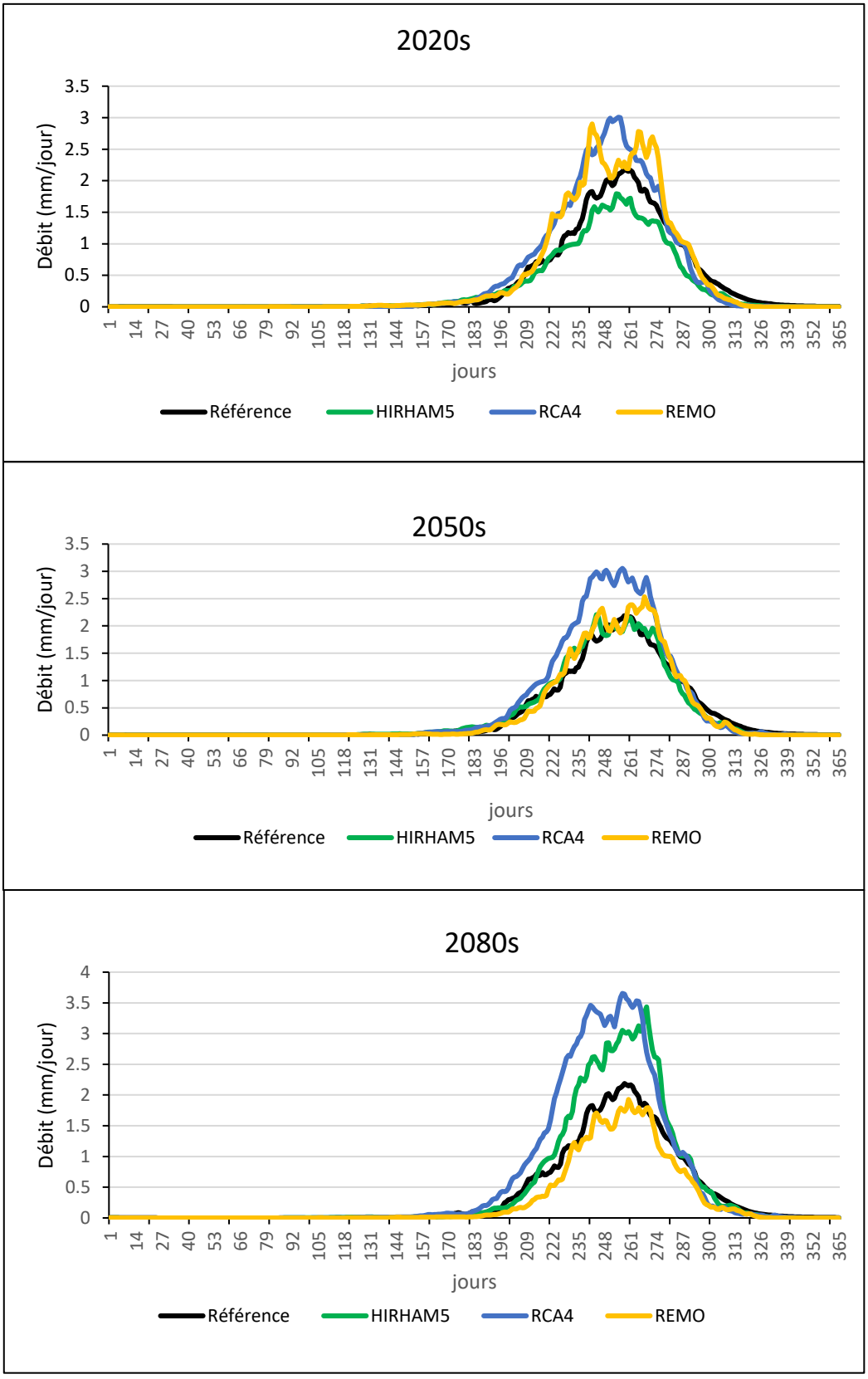


Figure 19 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP8.5 par HBV

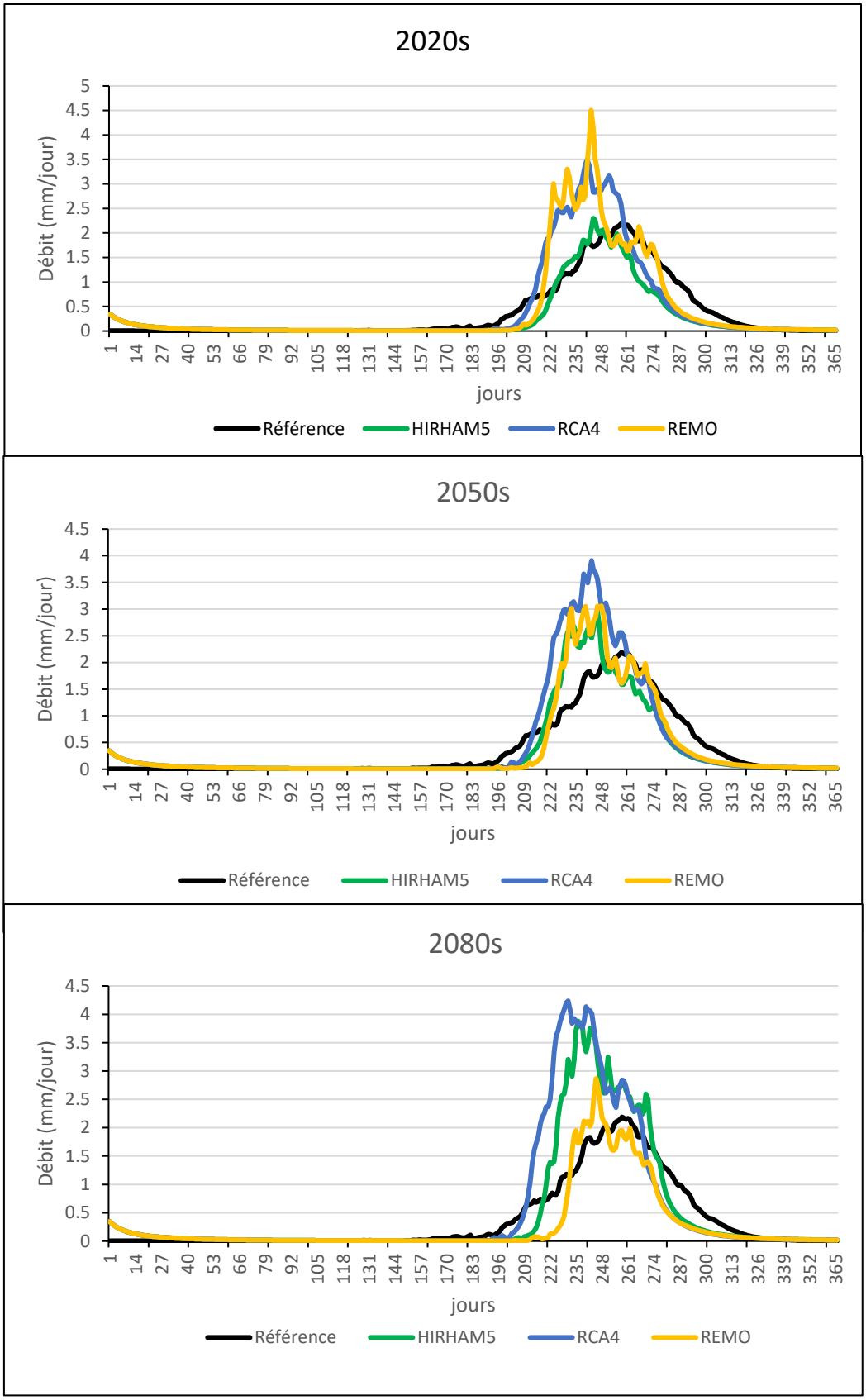


Figure 20 : Hydrogrammes des débits moyens annuels des projections des MCR pour les horizons 2020s, 2050s et 2080s et de la référence 1961-1990 sous le scénario RCP8.5 par GR4J

- **Taux de changement des débits par rapport à la période de référence**

Le tableau 7 présente le taux de changement au niveau des débits des différents modèles climatiques par rapport à la période de référence selon le scénario RCP4.5. D'après ce tableau, par rapport à la période de référence les modèles climatiques RCA4 et REMO prévoient une augmentation des débits moyens annuels allant de 30% à 51% pour le modèle HBV contre 24% à 41% pour le modèle GR4J dans l'horizon 2020s. Pour l'horizon 2050s, ils prévoient une augmentation des débits qui varie de 5% à 19% pour le modèle HBV et de 9% à 13% pour le modèle GR4J par rapport à la période de référence. L'horizon 2080s sera aussi marquée par une augmentation des débits par rapport à la période de référence avec une variation de 26% à 33 % pour le modèle HBV et 20 % à 22% du côté du modèle GR4J. En ce qui concerne le modèle climatique HIRHAM5, il prévoit une diminution de 15%, 17% respectivement pour les périodes 2020s et 2050s et une augmentation de 0.99% à l'horizon 2080s des débits par rapport à la période de référence avec le modèle HBV. Par contre, avec le modèle GR4J on a une diminution comprise entre 3% à 21% sur les trois horizons des débits par rapport à la période de référence.

Tableau 7 : Taux de changement (%) des débits moyens annuels des différents horizons par rapport à la période de référence sous le scénario RCP4.5

	HBV			**GR4J**		
Modèles climatiques	**2020s**	**2050s**	**2080s**	**2020s**	**2050s**	**2080s**
HIRHAM5	-17.24	-15.42	0.99	-20.36	-21.31	-3.31
RCA4	51.79	19.77	33.54	41.62	13.54	22.91
REMO	30.59	5.68	33.54	24.06	9.73	20.67

Le tableau 8 indique selon le scenario RCP8.5 que le modèle HBV et le modèle GR4J prévoient respectivement une augmentation de 21% à 24% et 18% à 19% pour l'horizon 2020s et avec l'horizon 2050s, 5% à 36% et 4% à 28% des débits par rapport à la période de référence pour ce qui est des données des modèles climatiques RCA4 et REMO. Avec l'horizon 2080s, le modèle HBV et le modèle GR4J prévoient respectivement une augmentation de 60% et 49% des débits par rapport à la période de référence avec les données du modèle climatique régional RCA4 mais une diminution de 24% et 23% des débits par rapport à la période de référence avec les données du modèle climatique REMO. Avec les données du modèle climatique HIRHAM5, il y aura une diminution de 20% des débits par rapport à la période de référence sur l'horizon

2020s et une augmentation de 1% et 32% respectivement sur les horizons 2050s, 2080s pour le modèle HBV. Le modèle GR4J prévoit une diminution de 3% et 25% respectivement des écoulements par rapport à la période de référence sur les horizons 2020s et 2050s. Pour l'horizon 2080s, il est prévu une augmentation des débits par rapport à la période de référence de 32% pour le modèle HBV contre 30% pour le modèle GR4J.

Tableau 8 : Taux de changement (%) des débits moyens annuels des différents horizons par rapport à la période de référence sous le scénario RCP8.5

	HBV			**GR4J**		
Modèles climatiques	**2020s**	**2050s**	**2080s**	**2020s**	**2050s**	**2080s**
HIRHAM5	-20.39	1.66	32.54	-25.00	-3.58	30.47
RCA4	24.75	36.37	60.79	19.05	28.79	49.76
REMO	21.93	5.17	-24.02	18.69	4.82	-23.83

2.2. Discussion

Les résultats de la correction de biais des MCR effectuée par la méthode ISIMIP témoigne de la bonne capacité de cette méthode a corrigé les biais. Ces résultats concordent avec ceux de Obada (2017) qui a utilisé cette méthode sur le bassin de la Mékrou.

En ce qui concerne la capacité des modèles HBV et GR4J à reproduire le fonctionnement du bassin, les performances obtenues en calage et en validation à court et à long terme et pour la simulation des débits moyens annuels montre la grande capacité de ces deux modèles à reproduire les écoulements. Ces capacités de reproduction sont en accord d'une part, avec les travaux de Vissin (2007) sur le bassin béninois du fleuve Niger, Amoussou et al (2014) sur le bassin du Mono à Nangbéto et Kodja (2018) sur le bassin de l'Ouéme à Bonou. Ces auteurs ont montré la grande qualité du modèle GR4J dans la reproduction des écoulements. D'autre part, ces résultats sont semblables à ceux de Badou (2016) sur la portion du bassin du Niger au Bénin, Obada (2017) sur le bassin de la Mékrou, Hounguè (2020) sur le delta de l'Ouémé, Chabi et al (2021) sur le bassin de l'Ouémé à Savè et Bossa et al (2020) sur le bassin de Lofin et la vallée intérieure de Lofin au Burkina Faso avec la performance du modèle HBV. Il faut noter que le

modèle HBV est plus performant dans la simulation des écoulements de notre bassin d'étude comparativement au modèle GR4J.

Pour ce qui est de l'évolution des écoulements futurs sur les trois horizons 2020s, 2050s et 2080s sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5), la diminution prévue par le modèle climatique régional HIRHAM5 sur les horizons 2020s, 2050s sous le scénario RCP4.5 et sur l'horizon 2020s avec le scénario RCP8.5, s'accorde avec les résultats de Biao (2017) qui a prévu aussi une diminution des écoulements avec ce modèle climatique sur ces horizons. L'augmentation des écoulements avec le modèle climatique régional REMO sur tous les horizons sous le scénario RCP4.5 et l'horizon 2020s sous le scénario RCP8.5 concorde avec les travaux de Lawin et al (2018) qui ont montré une augmentation des écoulements sur les horizons jusqu'en 2050. Le modèle climatique RCA4 prévoit une augmentation allant de 13% à 51% des débits moyens annuels sur tous les trois horizons avec les deux modèles hydrologiques sous le scénario RCP4.5. Par contre, il prévoit avec les deux modèles hydrologiques sous le scénario RCP8.5 une augmentation sur les trois horizons de 19% à 60%. La diminution des écoulements prévue par le modèle climatique REMO sur l'horizon 2080s sous le scénario RCP8.5 et l'augmentation prévue par le modèle climatique régional HIRHAM5 sur l'horizon 2050s dudit scénario au niveau du modèle HBV, rejoignent les résultats de Obada (2017) sur le bassin de la Mékrou. Ces différences sont essentiellement dues aux grandes incertitudes liées aux prévisions des précipitations dans la région Ouest africaine par les différents MCR (Obada, 2017).

Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous pouvons retenir que la méthode ISIMIP arrive à corriger les biais des MCR. Les résultats de la modélisation du fonctionnement du bassin par les deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J), attestent la capacité de ceux-ci à reproduire ce fonctionnement. Quant à l'évolution future des débits sur ce bassin avec les données des modèles climatiques régionaux en entrées des modèles hydrologiques, il ressort que cette évolution diffère d'un modèle climatique régional à un autre sous chacun des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) et de façon générale, la tendance est à l'augmentation des écoulements sous les deux scénarios.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude vise à évaluer l'impact du changement climatique sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou.

Les résultats de l'évaluation de la correction de biais par la méthode ISIMIP montrent la diminution de MAE et MRSE des données pluviométriques non corrigées de tous les MCR à l'exception du MRSE du modèle climatique régional REMO seul. Avec ces résultats il est donc logique de dire que la méthode de correction de biais ISIMIP est efficace dans la correction des biais des différents MCR de l'étude.

La modélisation des débits du bassin a été effectuée sur la période de référence 1961 – 1990 avec les modèles hydrologiques HBV et GR4J. On note dans l'ensemble une bonne simulation des débits par les deux modèles. Les meilleurs critères de performances (NSE, R^2, APB) à court et à long terme et avec les débits moyens annuels, témoignent de la capacité des deux modèles à reproduire les débits du bassin. Cependant, le modèle HBV s'est avéré être le plus performant des deux. Ainsi, avec ces résultats on peut dire que les deux modèles sont efficaces dans la simulation des débits de ce bassin ce qu'ils peuvent servir pour la projection des débits futurs.

L'analyse de l'évolution future des débits sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec les données des MCR comme des entrées des modèles hydrologiques révèle avec les débits moyens annuels que cette évolution diffère d'un modèle climatique régional à un autre et selon le scénario. Ainsi, sous le scénario RCP4.5 le modèle HIRHAM5 prévoit avec les deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J) une diminution allant de 15% à 21% des débits par rapport à la période de référence (1961 – 1990) pour les horizons 2020s (2010 – 2040) et 2050s (2041 – 2070) contre une augmentation de 0.99% pour le modèle HBV et une diminution de 3% avec le modèle GR4J pour l'horizon 2080s (2071 – 2100). Les MCR (RCA4 et REMO) projettent avec les deux modèles hydrologiques une augmentation de 5% à 51% des débits par rapport à la période de référence pour les trois horizons (2020s, 2050s et 2080s). Avec le scénario RCP8.5, le modèle climatique HIRHAM5 projette avec les deux modèles hydrologique une diminution de 20% à 25% des débits par rapport à la période de référence pour l'horizon 2020s contre une augmentation de 1% avec le modèle HBV et une diminution de 3% avec le modèle GR4J pour l'horizon 2050s. Au niveau de la période 2080s, on aura une augmentation de 30% à 32%. Avec le modèle climatique REMO on aura une augmentation de 19% à 60% pour les trois périodes avec les deux modèles hydrologiques. Quant au modèle REMO, on assistera aux

horizons 2020s et 2050s à une augmentation de 4% à 21% des débits par rapports à la période de référence pour une diminution de 23% à 24% à l'horizon 2080s avec les deux modèles hydrologiques (HBV et GR4J).

En somme, nous pouvons dire que le présent travail donne un nouveau regard sur l'impact du changement climatique sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou avec l'utilisation de trois modèles climatiques régionaux (HIRHAM5, RCA4 et REMO) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec la méthode ISIMIP pour la correction des biais des MCR.

PERSPECTIVES

- Evaluer l'impact des changements climatiques sur les écoulements en utilisant d'autres modèles hydrologiques tout en prenant en compte la performance de l'ensemble des modèles climatiques régionaux et leur combinaison à travers ces données.
- Evaluer l'impact des changements climatiques sur les écoulements en prenant en compte l'utilisation des terres.

Références bibliographiques

1. Akognongbe, A., Abdoulaye, D., & Vissin, E. W. (2014). *Dynamique de l ' occupation du sol dans le bassin versant de l ' O ueme à l ' exutoire de Bétérou (Bénin) Résumé*. *10*(2), 228–242.

2. Amoussou, E., Houessou, S., Tramblay, Y., Camberlin, P., Houndenou, C., Boko, M., & Mahe, G. (2015). *Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve mono*. 17–23.

3. Amoussou, Ernest, Tramblay, Y., Totin, H. S. V, & Mahé, G. (2014). *Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo / Bénin). Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques*, *59*(11), 2060–2071. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.871015

4. Badou, D. F. (2016). *Multi-model evaluation of blue and green water availability under climate change in four-non sahelian basins of the niger river basin*. University of Abomey-Calavi (UAC) Institut; National de l'Eau (INE) *(PhD), Pp 155.*

5. Bakayoko, S., Ouattara, I., Dao, A., Diallo, S., & Kamagaté, B. (2020). *Relation entre couvert végétal et les termes du bilan hydrologique dans le bassin versant forestier de la Hana au sud- ouest de la Côte d ' Ivoire [Relationship between plant cover and the terms of the hydrological balance in the forest watershed of Hana in the south-west of Côte d ' Ivoire]*. *31*(3), 560–574.

6. Biao, E. I. (2017). *Assessing the Impacts of Climate Change on River Discharge Dynamics in Oueme River Basin. Hydrology* https://doi.org/10.3390/hydrology4040047

7. Bossa, A. Y., Hounkpè, J., Yira, Y., Serpanti, G., Lidon, B., Fusillier, J. L., Sintondji, L. O., & Tondoh, E. (2020). *Managing New Risks of and Opportunities for the Agricultural Development of West-African Floodplains : Hydroclimatic Conditions and Implications for Rice Production*.

8. Chabi, A., Zandagba, E. B. J., Obada, E., Biao, E. I., Alamou, E. A., & Afouda, A. (2021). *Impact of climate change on water availability in the Oueme catchment at the outlet of the Save ' s bridge*. 255–260

9. Cocker, F., Vodounou, J. K., & Yabi, J. A. (2019). *Évolution récente des débits dans la basse vallée de l ' Ouémé , Sud -Benin*. *1*.

10. Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). *A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach*. 219–236. https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013

11. Houngue, R. (2020). *Climate change impacts on hydrodynamic functioning of oueme delta (BENIN). PhD thesis*. *Pp 170.*

12. Kodja, D. J. (2018). *Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l ' Ouémé à l ' exutoire de Bonou en Afrique de l ' Ouest HAL Id : tel-01869842*. *Thèse de doctorat, Université de Montpellier, Université d'Abomey-Calavi*. *Pp 288.*

13. Lawin, A., N'Tcha M'Po, Y., Biaou, C. A., Komi, K., Hounguè, R., Yao, K. B., & Afouda, A. A. (2018). *Mid-Century Daily Discharge Scenarios Based on Climate and Land Use Change in Ouémé River Basin at Bétérou Outlet*. 1–14. https://doi.org/10.3390/hydrology5040069

14. M'Po, Y. N., Lawin, A. E., Oyerinde, G. T., Yao, B. K., & Afouda, A. A. (2016). *Comparison of daily precipitation bias correction methods based on four regional climate model outputs in ouémé*. *4*(6), 58–71. https://doi.org/10.11648/j.hyd.20160406.11

15. Obada, Ezéchiel. (2017). *Approche de quantification des changements récents et futurs de quelques paramètres hydro-climatiques dans le bassin de la Mékrou (Bénin) International*. Université d'Abomey-Calavi (UAC). *Pp 212.*

16. Obada, Ezekiel, Alamou, E. A., Zandagba, E. J., & Biao, I. E. (2016). *Etude comparative de sept méthodes de correction de biais appliquées à trois Modèles climatiques régionaux dans le bassin versant de la Mékrou (Bénin , Afrique de l ' Ouest)*. *6*(octobre).

17. Ouikotan, B. (2009). *Etude de la propagation des crues du fleuve oueme entre beterou et save. Mémoire DEA. Université d'Abomey-Calavi (UAC). 88 p.*

18. Paeth, H., Hall, N. M. J., Gaertner, M. A., Alonso, M. D., Polcher, J., Ruti, P. M., Fink, A. H., Gosset, M., Lebel, T., Gaye, A. T., Rowell, D. P., Moufouma-okia, W., Jacob, D., Rockel, B., & Giorgi, F. (2011). *Progress in regional downscaling of west African precipitation*. *82*, 75–82. https://doi.org/10.1002/asl.306

19. Perrin, C., Michel, C., & Andre, V. (2003). *Improvement of a parsimonious model for*

streamflow simulation. *279*, 275–289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7

20. Taïbi, S., Anza, F. Z. H., & Zeroual, S. (2021). *Etude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie)*. *7*, 1860–1869.

21. Taïbi, Sabrina, Zeroual, A., & Melhani, N. (2021). *Evaluation de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques régionaux Cordex-Africa pour la prévision des pluies : cas du bassin côtier oranais*. 213–218.

22. Tossounon, A. (2009). *Article de presse : Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau au Bénin*.

23. Vissin, E. (2007). *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. *Thèse de Doctorat de l'Universite de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.*