



RÉPUBLIQUE DU BÉNIN  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ NATIONALE DES SCIENCES, TECHNOLOGIES,  
INGÉNIERIE ET MATHÉMATIQUES (UNSTIM) D'ABOMEY

**ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉNIE MATHÉMATIQUE ET  
MODÉLISATION**

**MÉMOIRE**

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

Spécialité : **Mathématiques Appliquées et Modélisation**

Option : **Modélisation Aléatoire, Statistique et Finance (MASF)**

---

**Impact des changements climatiques sur la dynamique des  
débits du Fleuve Ouémé à Bétérrou**

---

Présenté par :  
**Jules Fiacre YEDEDJI**

Sous la supervision de :  
**Prof Éric A. ALAMOU**  
**Enseignant-Chercheur à l'ENSTP/UNSTIM**  
**Professeur Titulaire des Universités du CAMES**

Sous l'encadrement de :  
**Dr (MA) Eliézer Iboukoun BIAO**  
**Enseignant-Chercheur à l'ENSGMM/UNSTIM**

**Soutenu à Abomey, le 14/12/2023**

Composition du jury

Président : Prof.

**Année académique : 2022 - 2023**

# Approbation

Nous certifions que le présent mémoire a été réalisé par l'auteur. Il est arrivé à terme et peut être soutenu devant un jury.

Abomey, le .....

## Signatures

Encadreur :

Superviseur :

**Dr Eliézer Iboukoun**  
**BIAO**

*Maître-Assistant des*  
*Universités de CAMES*

**Prof. Adechina Eric**  
**ALAMOU**

*Professeur Titulaire des*  
*Universités de CAMES*

# Dédicace

Je dédie ce travail à mon père **Edmond YEDEDJI** et à ma mère **CAKPO Florentine**,  
Recevez ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce sacrifice et l'exemplarité  
dont vous avez su faire preuve,

— Merci de m'avoir éduqué et porté au propre comme au figuré,

— Merci d'avoir adapté votre vie pour rendre la mienne moins compliqué.

Un simple merci ne pourra vous combler et j'espère de tout cœur pouvoir vous honorer  
et vous rendre fier.

*Jules Fiacre YEDEDJI*

# Remerciements

Je ne pourrai commencer la rédaction de ce mémoire sans adresser mes sincères remerciements au Tout puissant Jehovah pour m'avoir assisté et protégé tout au long du travail.

Je tiens à remercier sincèrement

- Feu Prof. Gérard DEGAN, premier Recteur de l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey;
- Prof. Joachim GBENOU, Recteur de l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey;
- Le Docteur Aliou DJIBRIL MOUSSA, Coordonnateur de l'Ecole Nationale Supérieure de Génie Mathématique et Modélisation (ENSGMM);
- Mon encadreur Dr Eliézer Iboukoun BIAO pour toute sa patience, sa disponibilité et son sens du travail bien accompli.
- Professeur Eric Adéchinan ALAMOU pour avoir donné de son temps et son énergie pour superviser ce travail.
- M. François COKOU, merci de m'avoir aidé dans le cadre de mon stage de fin de formation.
- Tous les enseignants de l'ENSGMM pour la formation qu'ils m'ont donnée et la rigueur dont ils ont su faire preuve;
- M Souradjou GBADAMASSI, Secrétaire général d'entité de l'Ecole Nationale Supérieure de Génie Mathématique et Modélisation (ENSGMM);
- Prof. Adolphe TCHEHOUALI et Prof. Christian AKOWANOU respectivement premiers Directeur et Directeur adjoint de l'INSPEI;
- Toute l'équipe du cabinet Stat'lab Afrique
- Tous les membres du Rotary club de Bohicon et du Rotaract club de Bohicon. Un remerciement spécial à ma marraine Rakiatou SAMBO , Présidente du Rotary Club de Bohicon
- Mes frères Charles YEDEDJI et Samuel YEDEDJI ainsi que mon frère Firmin YEDEDJI pour leur assistance et encouragement. Merci à vous.
- Mme Murielle TOHOUNDE et AGBONAGO Alexandre.
- Tous mes camarades de l'ENSGMM et de l'INSPEI ainsi que mes amis qui ont été d'une aide capitale.
- Tous les membres du club RFI UNSTIM Abomey.
- Le jury pour avoir accepté consacrer leur temps pour l'évaluation de ce mémoire.

# Table des matières

<b>Dédicace</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1. Contexte et justification . . . . .	1
2. Clarification de quelques concepts . . . . .	2
3. Revue de littérature . . . . .	7
3.1 Variabilité climatique . . . . .	8
3.2 Caractérisation de la variabilité hydroclimatique et étude du fonctionnement hydrologique . . . . .	8
3.3 Utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique . . . . .	9
3.4 Caractérisation de l'évolution futur des débits . . . . .	12
4. Objectif de l'étude . . . . .	12
5. But de la recherche . . . . .	12
6. Limite de l'étude . . . . .	12
<b>1 Milieu de l'étude</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction . . . . .	13
1.2 Localisation . . . . .	14
1.3 Géomorphologie et géologie . . . . .	14
1.4 Végétation . . . . .	15

1.5	Climat et hydrographie . . . . .	15
1.6	Types de sols et occupation des terres . . . . .	17
1.6.1	L'occupation du sol de 1978 . . . . .	17
1.6.2	L'occupation du sol de 1998 . . . . .	17
1.6.3	L'occupation du sol de 2010 . . . . .	18
1.7	Activité socio-économique . . . . .	20
1.8	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Données, matériel et méthodes</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Données . . . . .	22
2.3	Matériels . . . . .	23
2.4	Méthodes . . . . .	23
2.4.1	Qualité et données observées . . . . .	24
	Correction de biais . . . . .	24
	Les méthodes de correction de biais utilisées . . . . .	24
2.4.2	Description du modèle choisi pour l'estimation des débits (ModHyPMA) . . . . .	27
	Processus de transformation Pluie-débit . . . . .	27
	Détermination des paramètres $\lambda, \nu$ . . . . .	28
	Méthode d'évaluation de performance de ModHYPMA . . . . .	30
2.5	Conclusion . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>32</b>
3.1	Introduction . . . . .	32
3.2	Evaluation des méthodes de corrections de biais . . . . .	32
3.3	Simulation des débits du fleuve dans la période de référence avec ModHyPMA	35
3.4	Projection futur des débits du fleuve. . . . .	38
3.5	Discussion . . . . .	40
3.6	Conclusion . . . . .	41

# Table des figures

1	Source d'émission de gaz à effet de serre(Ministère de la Transition Ecologique France, <a href="https://www.ecologie.gouv.fr/">https://www.ecologie.gouv.fr/</a> . . . . .	4
2	Evolution de l'émission du CO2 dans le monde entre 1970-2019 (Ministère de la Transition Ecologique France, <a href="https://www.ecologie.gouv.fr/">https://www.ecologie.gouv.fr/</a> ) . . . . .	5
3	Les trajectoires RCP(Ministère de la Transition Ecologique France, <a href="https://www.ecologie.gouv.fr/">https://www.ecologie.gouv.fr/</a> ) . . . . .	7
1.1	Carte géographique du fleuve Ouémé à Bétérou (AKognongbe et al, 2014 ) .	14
1.2	Hydrographie du fleuve Ouémé à Bétérou ( Adamou,2010) . . . . .	16
1.3	Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 1978 ( Akogongbe et al, 2014 ) . . . . .	17
1.4	Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 1998 (Akognongbe et al,2014) . . . . .	18
1.5	Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 2010 ( Akongnongbe et al,2014) . . . . .	19
2.1	Structure Schématique de ModHYPMA (Biao,2017) . . . . .	28
3.1	Précipitations brutes, observés et corrigées (EQM) sur la période 1961-1990	32
3.2	Précipitations brutes, observés et corrigées (SCALING) sur la période 1961-1990 . . . . .	33
3.3	Précipitations brutes, observés et corrigées (GQM) sur la période 1961-1990	33
3.4	Précipitations brutes, observés et corrigées (ISIMIP) sur la période 1961-1990.	34
3.5	Précipitations brutes, observés et corrigées (EQM,SCALING,GQM,ISIMIP) sur la période 1961-1990 . . . . .	34
3.6	Hydrogramme simulé comparé au débit observé (calage) à Bétérou . . . . .	36
3.7	Hydrogramme simulé comparé au débit observé (validation) Bétérou . . . . .	37

3.8	Hydrogramme moyen observés et simulés par le fleuve Ouémé à Bétérou pour les périodes de calibration et de validation . . . . .	37
3.9	Hydrogramme moyens des projections HIRHAM5 pour les horizons 2020,2050 et 2080 et la référence 1961-1990 pour le fleuve Ouémé avec les dérivés du scénarios RCP 4.5. . . . .	39
3.10	Hydrogramme moyens des projections HIRHAM5 pour les horizons 2020,2050 et 2080 et la référence 1961-1990 pour le fleuve Ouémé avec les dérivés du scénarios RCP 8.5 . . . . .	39



# Liste des photos

1.1 Pénurie d'eau dans un village de Parakou (PAS-PNA BENIN ,2019) .....	20
--	----

# Liste des tableaux

1.1	Etat de l'occupation de sol en 1978 et en 2010 (Source CENATEL) . . . . .	19
3.1	Statistique de performance des méthodes de corrections de biais. . . . .	35
3.2	Paramètres du calibrage du modèle MODHYPMA . . . . .	36
3.3	Critère de performance du modèle hydrologique basé sur le principe de moindre action (MODHYPMA) pour le fleuve Ouémé à Bétérou. . . . .	38

# Liste des Abréviations

**ANM** : Agence Nationale de Météorologie (Météo-Bénin)  
**AMMA-CATCH** : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine- Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique  
**CATCH** : Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique  
**CCNUCC** : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques  
**CENATEL** : Centre National de Télédétection et de Suivi Ecologique  
**CORDEX** : Coordinated Regional Downscaling Experiment  
**DGE** : Direction Général de l'eau  
**DMI-HIRHAM5** : Danmarks Meteorologiske Institut-HIRHAM5  
**EQM** : Empirical Quantile Mapping  
**GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat  
**GQM** :Gamma Quantile Mapping  
**ISIMIP** : Inter Sectoriel Impact Model Intercomparaison  
**MAE** : Mean Absolve Error  
**MRC** : Model Regional Climat  
**OMN** : Organisation Météorologique Mondiale  
**PAS-PNA** : Projet d'Appui Scientifique aux processus Nationaux d'Adaptation  
**RCP** : Representative Concentration Pathway  
**RMSE** : Root Mean Squared Error

## Résumé

La compréhension des impacts du changement climatique sur les ressources en eau est cruciale pour une leur bonne gestion et pour une bonne élaboration des stratégies d'adaptation. L'objectif de cette présente étude est d'évaluer les impacts du changement climatique sur la dynamique du débit du fleuve Ouémé à Bétérou. Pour atteindre cet objectif, une comparaison graphique entre quatre méthodes de correction de biais : ISIMIP, EQM, GQM et SCALING a été effectuée. L'approche de correction du biais permet de réduire les différences entre les précipitations observées et les données pluviométriques du modèle climatique régional HIRHAM5. Pour évaluer la performance de ces méthodes de correction, nous avons utilisé les métriques de performance RMSE et MAE. Des simulations hydrologiques à l'exutoire de Bétérou ont été réalisées avec un modèle hydrologique conceptuel basé sur le principe de moindre action (ModHyPMA). Ce modèle est conçu pour minimiser les incertitudes liées au processus pluie-débit et à la loi d'échelle, pour cette évaluation. Pour la projection future basée sur le modèle climatique HIRHAM5 deux scénarios ont été utilisés RCP4.5 et RCP8.5. D'après les résultats, la méthode SCALING a été la plus performante suivie de la méthode ISIMIP. Les résultats de la simulation des débits indiquent que ModHyPMA est adapté à la modélisation du débit dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Pour la projection future basée sur les scénarios RCP4.5, le débit annuel moyen projeté en utilisant HIRHAM5 à Bétérou diminue avec une ampleur de - 16% pour les deux horizons temporels : 2020 (2011-2040), 2050 (2041-2070) mais augmente de 12% pour la fin du siècle 2080(2071-2100). Concernant la projection future basée sur les scénarios RCP8.5, le débit annuel moyen projeté par HIRHAM5 à Bétérou diminue avec une amplitude -23% pour l'horizon temporel 2020 (2011-2040) et augmente pour les deux autres horizons avec une ampleur allant de 12% à 44%. Il faut noter que durant ce début de siècle 2020(2011-2041), les deux scénarios prédisent une diminution des débits du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Une augmentation des débits pour l'horizon temporel 2080 sera observée pour les deux scénarios.

**Mots clés :** débit de fleuve, changement climatique; la méthode SCALING; projection future; ModHyPMA; Bénin, HIRHAM5.

# Abstract

Understanding the impacts of climate change on water resources is crucial for their proper management and for the proper development of adaptation strategies. The objective of this present study is to assess the impacts of climate change on the flow dynamics of the Ouémé River in Bétérou. To achieve this goal, a graphical comparison between four bias correction methods : ISIMIP, EQM, GQM and SCALING was carried out. The bias correction approach reduces the differences between observed precipitation and rainfall data from the regional climate model HIRHAM5. To evaluate the performance of these correction methods, we used the RMSE and MAE performance metrics. Hydrological simulations at the Bétérou outlet were carried out with a conceptual hydrological model based on the principle of least action (ModHyPMA). This model is designed to minimize the uncertainties linked to the rainfall-runoff process and the scaling law, for this assessment. For the future projection based on the HIRHAM5 climate model two scenarios were used RCP4.5 and RCP8.5. According to the results, the SCALING method was the most efficient followed by the ISIMIP method. The flow simulation results indicate that ModHyPMA is suitable for modeling flow in the Ouémé basin at the Bétérou outlet. For the future projection based on the RCP4.5 scenario, the average annual flow projected using HIRHAM5 at Bétérou decreases with a magnitude of – 16% for the two time horizons : 2020 (2011-2040), 2050 (2041-2070) but increases by 12% for the end of the century 2080 (2071-2100). Concerning the future projection based on the RCP8.5 scenarios, the average annual flow projected by HIRHAM5 at Bétérou decreases with an amplitude -23% for the 2020 time horizon (2011-2040) and increases for the two other horizons with an amplitude ranging from 12% to 44%. It should be noted that during the start of the century 2020 (2011-2041), both scenarios predict a reduction in the flow of the Ouémé River at the Bétérou outlet. An increase in flow rates for the 2080 time horizon will be observed for both scenarios.

**Keywords** : river flow dynamics, climate change; the SCALING method, future projection, Bénin, HIRHAM5

L'Ecole Nationale Supérieure de Génie Mathématique et Modélisation (ENSGMM) n'entend donner ni approbation ni improbation aux opinions émises dans ce document. Les raisonnements et arguments reviennent donc à l'auteur.

# Introduction

## 1. Contexte et justification

Les ressources en eau jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs en Afrique de l'Ouest, tels que l'agriculture, la production d'électricité et la pêche. Cependant, le changement climatique représente un défi majeure pour ces ressources et les événements hydrologiques extrêmes. Les précipitations extrêmes devraient augmenter, en particulier dans les régions déjà humides, tandis que les périodes de sécheresse devraient augmenter dans les régions déjà sèches (Biao,2017). Ces changements ont des conséquences importantes sur la disponibilité de l'eau et rendent sa gestion plus difficile. En effet, le changement climatique a des conséquences significatives sur le cycle hydrologique en Afrique de l'Ouest. Le déficit de précipitations entraîne une diminution des débits des rivières, ce qui affecte directement les secteurs qui dépendent de l'eau, tels que l'agriculture, la production d'électricité et la pêche. Les sécheresses prolongées peuvent entraîner des pénuries d'eau, une diminution des rendements agricoles et une augmentation des conflits liés à l'accès à l'eau. D'autre part, les précipitations extrêmes sont également un problème croissant dans la région. Les pluies torrentielles peuvent provoquer des inondations et des crues soudaines, qui peuvent causer des destructions importantes des infrastructures, des pertes de vies humaines et des perturbations économiques. Les populations vivant le long des cours d'eau sont particulièrement vulnérables à ces événements.

De nos jours, les inondations et les crues soudaines se produisent plus fréquemment et avec une plus grande intensité et sont devenues l'un des risques naturels les plus dévastateurs dans les pays d'Afrique de l'Ouest. En 2009, de graves inondations ont été observées au Burkina-Faso et au Mali; en 2010, les inondations catastrophiques ont touché plus de 680 000 personnes et ont causé la mort de 46 personnes au Bénin. En 2012, des « inondations meurtrières » faisant chacune plus de 50 morts se sont produites au Niger et au Nigeria.

L'hydrologie du Bénin est provoquée par une saison des pluies unimodale au Nord, alors qu'elle est provoquée par une saison des pluies bimodale au Sud (Biao,2017). Il sera donc intéressant d'explorer les impacts du changement climatique projeté sur les débits du fleuve Ouémé à Bétérou . Cela sera utile pour mettre en œuvre des plans d'adaptation efficaces face aux événements extrêmes résultant du changement climatique.

## 2. Clarification de quelques concepts

### **Recharge**

C'est le mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol qui conditionne aussi l'alimentation naturelle d'aquifères ou de réservoirs souterrains, réalisée par puits d'injection, par épandage ou par modification des conditions naturelles. C'est également un processus par lequel la zone saturée d'un aquifère reçoit un apport d'eau extérieur, soit directement dans la formation géologique elle-même, soit indirectement par l'intermédiaire d'une autre formation géologique (CASTANY, 1982).

### **Apports ou pluie efficace**

Ils représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible, à la surface du sol, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle. « Les apports sont égaux à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle » (CASTANY, 1982).

### **Modèles hydrologiques**

Ils sont nécessairement simplificateurs et réducteurs de la complexité naturelle. Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la plus proche possible de la situation réalité.

### **Hydrogramme**

L'hydrogramme d'un bassin est défini comme l'hydrogramme de ruissellement pur résultant d'une pluie nette de hauteur unité produite de façon homogène sur la totalité du bassin (averse unitaire) en un temps donné.

### **Tarissement**

C'est la décroissance du débit d'une source en régime non influencé, liée à la baisse des niveaux et à la diminution de réserve en période sans alimentation du réservoir, ou de décroissance de l'écoulement souterrain d'un cours d'eau, dans les mêmes conditions.

### **Changement climatique**

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le changement climatique est un changement du climat attribué directement ou indirectement à toute activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère de la Terre et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes de temps comparables.

Selon, 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.



### **Cause des changements climatiques**

La plupart des membres de la communauté scientifique s'accordent à dire que la majeure partie du réchauffement observé durant ce début du siècle est dû à l'action de l'homme (GIEC, 2023). Nos habitudes de consommation seraient donc parmi les causes de ces changements. On sait que l'atmosphère de la Terre laisse passer la lumière du soleil qui réchauffe la surface du globe. La chaleur qui s'élève de la surface de la terre est en partie absorbée par les gaz et la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, ce processus qui conduit à élever la température est appelé «effet de serre». En l'absence de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)), etc..., la plus grande partie de la chaleur pénétrant dans l'atmosphère terrestre serait directement réémise dans l'espace, et la température moyenne de la Terre serait de -18 °C au lieu de 15° C.

Au cours des 10 000 dernières années, la quantité de ces gaz à effet de serre présents dans notre atmosphère est demeurée relativement constante et a permis à la Terre de conserver un climat relativement stable. La concentration de ces gaz a commencé à croître avec l'avènement de l'industrialisation, la hausse de la demande en énergie, la croissance démographique et les changements dans l'utilisation du territoire. Au Bénin, les différents méfaits environnementaux (pollution par les déchets domestiques, les fertilisants, toxiques, déchets industriels et biomédicaux, pollution atmosphérique, etc.) causés par l'action anthropique souvent peu respectueuse de l'environnement, visibles et parfois mesurables à des échelles spatiales et/ou temporelles plus ou moins maîtrisables, contribuent directement ou indirectement au phénomène global du réchauffement de la planète. Les conséquences sont entre autre : une réduction de la production alimentaire des cultures et de la production halieutique, une augmentation de la mortalité liée à la chaleur, La perte de productivité du travail liée à la chaleur et les inondations dues à l'élévation du niveau de la mer (GIEC,2022). Ce rapport souligne également que les sources d'émissions de gaz à effet de serre (figure1.1) proviennent principalement des secteurs comme l'industrie avec une utilisation croissante des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz). L'agriculture, les transports ou l'habitat constituent également des sources de pollution. Notons qu'en 2019, les émissions de CO<sub>2</sub> hors UTCATF atteignent 38,0 milliards de tonnes, soit une multiplication par 2,4 depuis 1970. Ces émissions sont issues à 39% de la combustion de charbon, contre 30% pour le pétrole et 19% pour le gaz naturel. Le reste, soit 12%, est lié aux procédés industriels (comme, par exemple, la transformation de calcaire en chaux pour fabriquer du ciment).

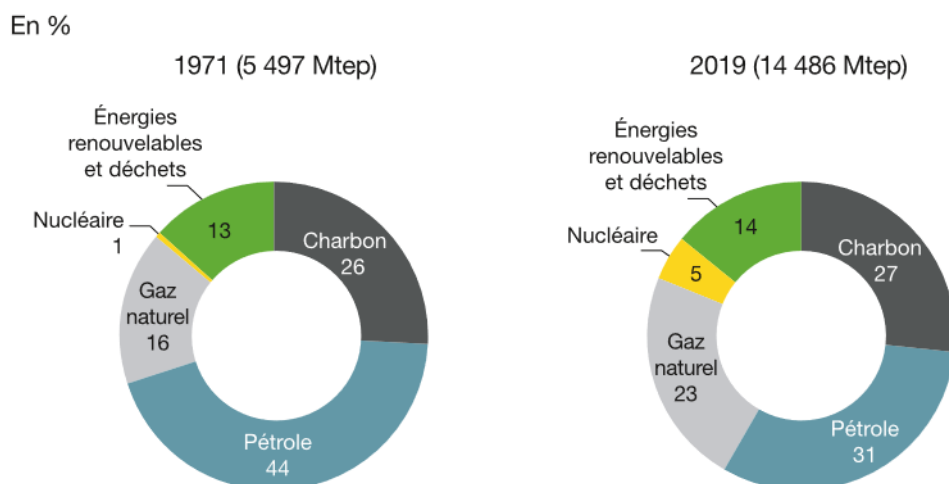


FIGURE 1 – Source d'émission de gaz à effet de serre (Ministère de la Transition Ecologique France, <https://www.ecologie.gouv.fr/>)

Les émissions liées à l'énergie dépendent du niveau de consommation de cette dernière ainsi que du mix énergétique primaire, qui, au niveau mondial, reste dominé par les énergies fossiles en 2019 (pétrole, charbon et gaz naturel : 81% du total à elles trois). Le pétrole demeure la première source d'énergie dans le monde, même si sa part a baissé de 13 points entre 1971 et 2019, au bénéfice principalement du gaz naturel (+ 7 points) et de l'énergie nucléaire (+ 4 points). Le charbon représente toutefois la première source d'émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, il affiche un facteur d'émission nettement supérieur à ceux du gaz naturel et du pétrole. La consommation de charbon, qui avait fortement augmenté dans les années 2000, tend à stagner, voire à diminuer ces dernières années. Bien que globalement stable depuis 1971, la part des énergies renouvelables croît légèrement depuis dix ans, pour atteindre 14% du mix en 2019.

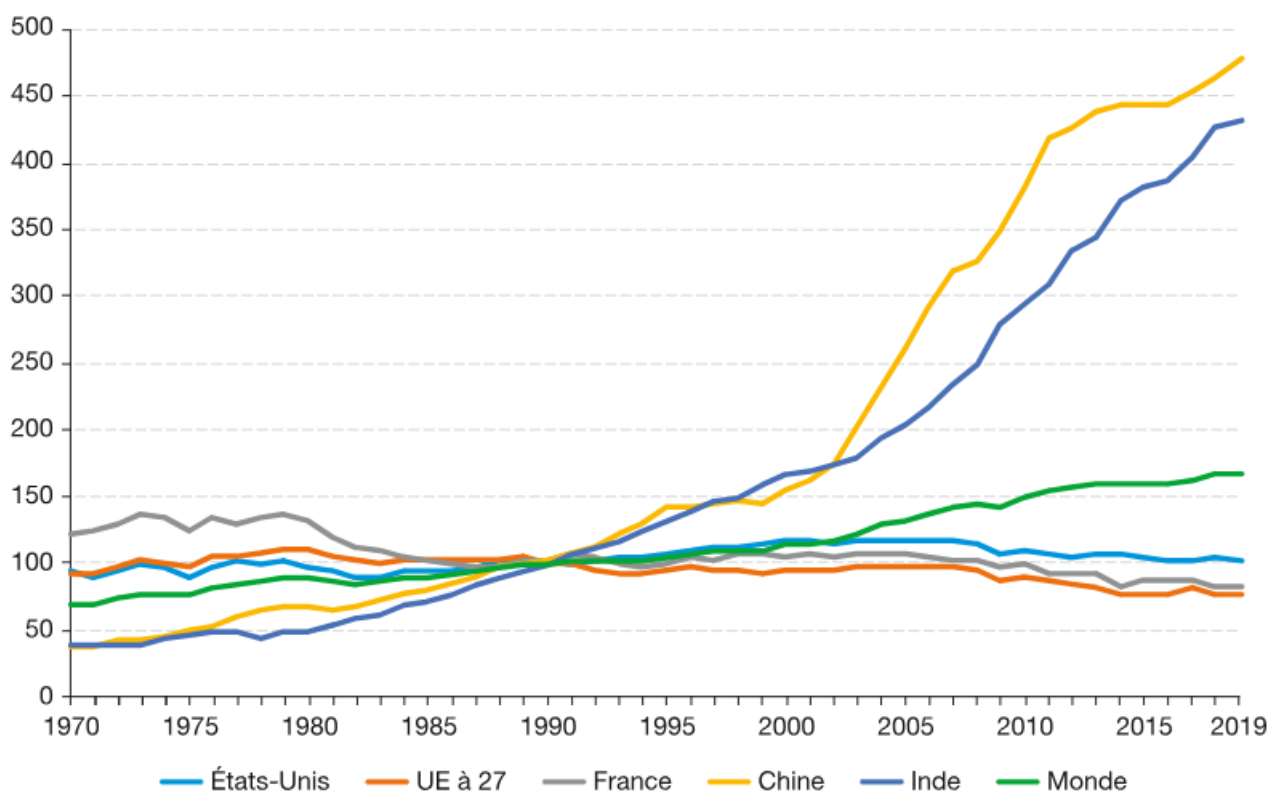


FIGURE 2 – Evolution de l'émission du CO<sub>2</sub> dans le monde entre 1970-2019 (Ministère de la Transition Ecologique France, <https://www.ecologie.gouv.fr/>)

En 2019, la Chine reste le premier pays émetteur mondial de CO<sub>2</sub> (30,3 %), devant les États-Unis (13,4 %), l'Union européenne (7,7 %) et l'Inde (6,8 %). Entre 1990 et 2019, les émissions ont progressé de 68 % (soit de 15,3 Gt CO<sub>2</sub>). Sur cette période, les plus gros contributeurs à cette hausse sont la Chine (+ 380 %, soit 9,1 Gt CO<sub>2</sub>), l'Inde (+ 330 %, soit 2,0 Gt CO<sub>2</sub>) et la zone Moyen-Orient et Afrique du Nord (+ 210 %, soit 2,2 Gt CO<sub>2</sub>). Sur la même période, les émissions des États-Unis ont très légèrement augmenté (+ 0,8 %), alors que celles de l'Union européenne ont baissé (- 23,1 %), de même que celles de la France (- 17,3 %).

### Effet sur la température

La température mondiale sur la période 2011-2020 était 1,1°C plus élevée que celle sur la période 1850-1900 avec un réchauffement plus important sur les continents (+1,6°C) qu'au-dessus des océans (+0,9°C). Le rythme du réchauffement sur les 50 dernières années est sans précédent depuis au moins 2000 ans.

### Effet sur la pluviométrie

Plusieurs régions de la planète voient une augmentation des précipitations. Dans la plupart des régions de latitude moyenne et haute sur les continents de l'hémisphère Nord, une augmentation de 0,5 à 1 % par décennie a été observée. Elle est accompagnée d'une expansion de la couverture nuageuse de 2 %. Il semble que les précipitations sur les terres

tropicales (10°N-10°S) aient augmenté de 0,2-0,3% par décennie. Cependant, au cours du XXe siècle, les précipitations dans les régions subtropicales de cet hémisphère (10-30°N) ont diminué d'environ 0,3% par décennie. La fréquence et l'intensité des sécheresses semblent avoir augmenté dans certaines régions d'Afrique et d'Asie. L'évolution du climat au cours du XXe siècle correspond à ce qu'il faut s'attendre en présence d'une augmentation des gaz à effet de serre et des aérosols.

### **Effets du changement climatique sur la dynamique d'un fleuve**

Les effets du changement climatique sur la dynamique d'un fleuve s'expliquent par l'augmentation de la fréquence et l'intensité des précipitations, ce qui peut entraîner des crues plus fréquentes et plus importantes, une augmentation de la température de l'eau augmente, ce qui peut avoir un impact sur la qualité de l'eau et la vie aquatique et une diminution des précipitations et l'augmentation de l'évaporation qui réduisent la quantité d'eau disponible, ce qui peut affecter la navigation, l'irrigation et la production d'énergie hydroélectrique.

### **Les scénarios ou trajectoires RCP**

Les trajectoires RCP (pour Representative Concentration Pathway ou profils représentatifs d'évolution de concentration) représentent différentes évolutions possibles de la concentration en gaz à effet de serre (table 1 et figure 1). Elles sont exprimées en forçage radiatif (en Watts par mètre carré), c'est à dire la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par le système climatique. Elles sont au nombre de quatre, et nommées en fonction de l'augmentation du forçage radiatif en 2100 par rapport à l'année 2000 :

- + 2,6 W.m<sup>2</sup> pour RCP 2.6,
- + 4,5 W.m<sup>2</sup> pour RCP 4.5,
- + 6,0 W.m<sup>2</sup> pour RCP 6.0,
- + 8,5 W.m<sup>2</sup> pour RCP 8.5.

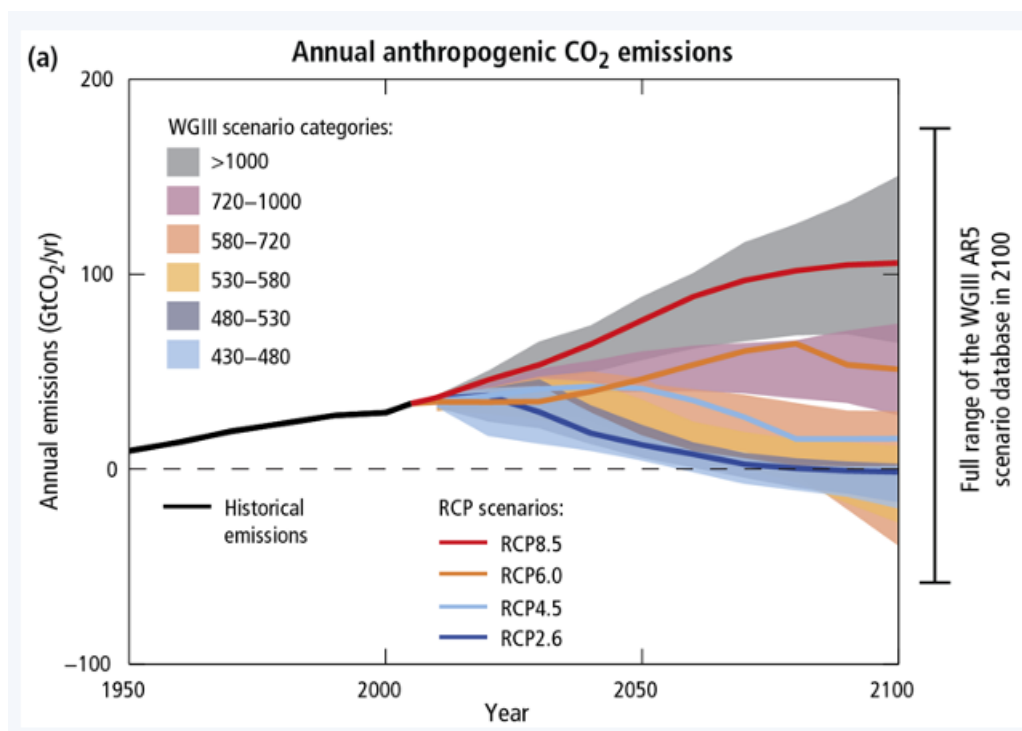


FIGURE 3 – Les trajectoires RCP(Ministère de la Transition Ecologique France, <https://www.ecologie.gouv.fr/>)

### Incertitude des projections climatiques

Pour les projections climatiques, il existe trois principales sources d'incertitudes. Nous avons :

- Les variabilités interne du climat : Notre climat est influencé par d'importantes fluctuations naturelles et imprévisibles.
- Incertitudes des modèles : Les modèles continuent d'être améliorés au futur du temps. Malgré leur robustesse , ils demeurent imparfait.
- Incertitude des scénarios d'émissions : L'évolution des émissions de gaz à effet de serre est également incertaine et il n'est pas possible pour le moment de déterminer exactement ce que seront les futures émissions.

## 3. Revue de littérature

Une revue de littérature permet de collecter, d'analyser et d'organiser plusieurs articles et contenus scientifique, fournit une vue d'ensemble globale des avancées scientifiques dans un domaine. Elle donne un aperçu des recherches menées, c'est-à-dire une mise à jour sur les questions déjà posées.

Il est donc primordiale pour nous de présenter une synthèse des travaux antérieurs, en particulier ceux dont nous avons utilisé les méthode(s) ou exploiter quelques résultats. Le choix de ces travaux a évidemment tenu compte de l'aire d'étude, des méthodes d'étude choisies et des problématiques développées. Nous avons privilégié les thèmes suivants :

- la variabilité climatique,

- la caractérisation de la variabilité hydroclimatique et l'étude du fonctionnement hydrologique,
- l'utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique,
- Caractérisation de l'évolution futur des débits

### **3.1 Variabilité climatique**

Parmi tous les paramètres climatiques, les précipitations sont les plus déterminantes dans les milieux tropicaux, notamment en Afrique de l'Ouest. Dans son travail sur la caractérisation de la saison des pluies au Burkina Faso, Boubakar (2012) montre qu'il y a baisse significative de la pluviométrie annuelle depuis 1970 pour une période de (1961-2010) . De l'étude comparative des sous périodes 1951-1969 (humide) et 1970-2000 (sèche), il ressort que les débuts de saison des pluies étaient plus généralement plus précoces lors de la première sous période puis tardifs à partir des années 1970. (Zondekon et al ) ont montré d'après leur résultat qu'il y'a une répartition inégale des précipitations marquées par les changements continus des conditions naturelles du bassin de l'Ouémé. Leur étude identifie trois phases dans l'évolution des précipitations. La première période 1987-1990 est marquée par des excédents pluviométriques. La seconde est caractérisée par des déficits pluviométriques entre la période 1990-2006 et la dernière caractérisée par une très forte instabilité dans l'évolution des précipitations, concerne la période 2006-2016. Avec l'application de du test de Pettitt aux série chronologiques, ils ont pu ressortir une rupture de stationnarité au seuil de 95%, mettant ainsi en évidence deux sous-périodes, 1987-2006 et 2007-2016. En revanche, Boko et Adjovi (1994) n'ont pas pu identifier clairement une tendance dans les séries pluviométriques des stations du Bénin méridional, une région de forte variabilité des précipitations. Toutefois, les résultats de cette étude suggèrent l'existence d'une tendance à la baisse à partir des années 1970, qui reste à être confirmée par un autre test plus puissant que les tests utilisés dans leur étude, basés sur le coefficient « Rs » de Spearman et sur le coefficient « t » de Mann-Kendall. La plupart des auteurs ont détecté une tendance à la baisse dans les séries pluviométriques ouest-africaines.

### **3.2 Caractérisation de la variabilité hydroclimatique et étude du fonctionnement hydrologique.**

Dans une étude sur l'influence des fluctuations pluviométriques sur les écoulements, Bricquet et al. (1995) mettent en évidence l'impact des déficits pluviométriques sur l'écoulement du bassin du fleuve Niger à Koulikoro au Mali. Les auteurs ont aussi montré qu'une baisse de la pluviométrie entraîne la diminution de l'écoulement souterrain et l'augmentation du coefficient de tarissement.

Par ailleurs, Vissin et al. (2017) ont montré que les chroniques de la pluviométrie sur le fleuve Ouémé à Bétérou ont connu une « rupture de stationnarité » en 1972.

Les changements pluviométriques observés se sont largement amplifiés dans les écoulements et la recharge des sous bassins versants. Il a aussi souligné que les déficits les plus marqués s'observent au cœur de la saison des pluies, entraînant des déficits d'écoulements très sensibles. Ainsi, la sécheresse pluviométrique des dernières décennies serait responsable de la sécheresse hydrologique enregistrée dans le bassin. Mahe et

Olivry (1995) ont montré que les variations des précipitations et les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale sont liées aux flux d'humidité associés à la mousson et à l'alizé maritime de l'Atlantique. Les relations pluie-débit ont permis d'évaluer les écoulements côtiers pour les petits bassins. A partir des écarts centrés réduits des précipitations annuelles, les auteurs ont pu montrer que la hauteur de pluie diminue progressivement de 1951 à 1989, avec une rupture en 1970. Ainsi, selon eux, le déficit pluviométrique des décennies 1970 et 1980 conduit à une forte diminution du coefficient d'écoulement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Ces diminutions semblent liées à une modification des caractéristiques de la réponse des sols aux précipitations et à un changement des relations rivière-aquifère. Dans une étude sur le bilan hydrologique en Guinée et au Togo, Sutcliffe et Piper, (1986) ont appliqué une méthode de régionalisation fondée sur une expression simplifiée du bilan hydrologique. Ces auteurs mettent en relation les pluies nettes et la lame écoulée annuelle. Les corrélations obtenues au Bénin et au Togo sont satisfaisantes.

RODIER (1964) a, pour sa part, mis en évidence la dépendance du débit non seulement par rapport aux facteurs climatiques mais aussi au degré de perméabilité du sol ou des couches géologiques, à la pente, à la taille du bassin et aux formations végétales. Abordant ce même axe de recherche, LE BARBE et al. (1993) ont analysé des données hydrométriques collectées au Bénin jusqu'en 1984, et proposent différentes méthodes d'estimation des écoulements. Leur étude prend en compte le bassin de l'Ouémé au Bénin et met en évidence des différences très nettes entre la zone de socle et celle de grès. L'importance des étiages et le tarissement sont fonction des superficies de grès. En conséquence, la répartition mensuelle des apports est très différente d'une formation géologique à l'autre. Pour les sous bassins situés sur la zone gréseuse, les apports de saison sèche représentent entre 10 et 20 % des volumes écoulés. Pour le grès, du fait de sa grande perméabilité, le temps niveau de remplissage à son état initial. Sur les autres formations géologiques, le socle en particulier, la perméabilité étant plus faible, il y a en revanche accumulation d'eau. Le niveau de remplissage varie alors d'autant plus que les pluies d'hivernage sont plus fréquentes. L'évolution de la fonction de production mise en évidence par cette étude montre le comportement différent des formations du socle et des grès que drainent les affluents du bassin de l'Ouémé. De ces différents travaux, il ressort un impact très marqué des déficits pluviométriques des dernières décennies sur les écoulements et la recharge des bassins. Tout en mettant en évidence la dépendance de l'écoulement de la pluie et de la recharge, ces auteurs ont caractérisé le fonctionnement différentiel des formations géologiques. Toutefois, ces études, tout en aboutissant à des résultats intéressants, présentent quelques imprécisions. Elles ne sont faites qu'aux pas de temps mensuel et annuel et souvent ne mettent pas assez en évidence l'impact de la rupture pluviométrique des années 1970, ni le poids des mois humides dans la péjoration pluviométrique observée déjà depuis plus de trois décennies.

### **3.3 Utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique**

Perrin (2000) montre que la simulation par des modèles mathématiques de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant a connu un essor considérable depuis le début des années 1960 grâce à l'évolution des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un nombre considérable de modèles, parmi lesquels on retrouve les

modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent le lien entre la pluie et le débit par agencements variés de réservoirs. Selon l'auteur, toutes les structures de ces modèles ont reçu les mêmes données et leurs paramètres ont été calés à l'aide d'une même procédure locale d'optimisation, la méthode « pas-à-pas », qui s'est montrée fiable pour localiser des optima satisfaisants. De nouvelles formulations de critères d'optimisation (critère de Nash) plus satisfaisante, ont été proposées. Les résultats des tests indiquent que les modèles « à réservoirs » sont nettement plus satisfaisants qu'un modèle de type « boîte noire » ne comprenant pas de schéma interne de suivi d'humidité du bassin. Par ailleurs, la structure du modèle, c'est-à-dire sa formulation interne, est apparue déterminante pour le succès du modèle. Il insiste également sur la complémentarité entre les différentes structures des modèles. Partant de ce constat, l'auteur opère des modifications dans la structure simple du modèle GR3J, qui était initialement parmi les plus performants, en une nouvelle organisation contenant quatre paramètres : la structure du modèle GR4J. Elle est jugée plus satisfaisante que les versions antérieures, notamment dans la simulation des étiages.

Les recherches de Lelay (2002), faites dans le cadre du projet CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique), ont simulé des écoulements de surface sur la période 1952-1984 à l'aide de deux modèles hydrologiques conceptuels simples à pas de temps mensuels (modèle GR2M et modèle de Conway) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (10 326 km<sup>2</sup>) au Bénin. Les résultats obtenus mettent en évidence la bonne aptitude de ces modèles à simuler les écoulements du bassin.

L'étude de Ouedraogo (2001) s'est intéressée aux limites de la notion de « norme hydrologique » et de « durée de retour » dans une région qui connaît un contexte climatique déficitaire depuis plus de trente ans. L'auteur utilise les modèles GR2M et Conway de la relation pluie-débit, basée sur les équations du bilan hydrique pour procéder à la régionalisation des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles, et cela afin de faire l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Il montre que les effets de la péjoration climatique se manifestent par une réduction des lames écoulées sur la période 1971-1997. ARDOIN-BARDIN (2004) analyse le développement de modèles des régimes hydrologiques des grands bassins régionaux couvrant seize pays africains de la façade atlantique situés entre 1,25° et 24,25° de latitude nord. L'auteur prévoit la transmission de ces outils de modélisation aux gestionnaires des ressources en eau dans le but d'utiliser les simulations de pluie issues des scénarii climatiques. L'étude met aussi en évidence la sensibilité des modèles aux données d'entrée et aux paramètres choisis. Le modèle GR2M utilisé par Lelay (2002) et Ouedraogo (2001) révèle une certaine fiabilité mais montre quelques difficultés à reproduire toute la variabilité des écoulements (saison humide, saison sèche). Ainsi, il ne prend pas en compte les paramètres des états de surface qui jouent un rôle non négligeable dans la dynamique hydrologique. Certains modèles, notamment GR2M et Conway, sont marqués par une incapacité à simuler les écoulements journaliers. D'après les résultats de l'étude sur l'impact du changement climatique de la dynamique des débits dans le bassin de l'Ouémé menée par Biao (2017), le Modèle ModHYPMA fait une bonne simulation des débits. Un résultat qui vient soutenir les travaux de Alamou (2011) sur la performance du modèle. Cette performance est démontrée également à travers une étude de comparaison faite par Alamou et al (2016) sur des modèles : GR4J, AWBM, TANK,



Sacramento, HBV, SMAR, IHACRES, SimHyd et ModHyPMA. Il ressort que le modèle ModHYPMA est le meilleur.

### 3.4 Caractérisation de l'évolution futur des débits

Peu d'étude sur l'évolution futur des débits au niveau du fleuve Ouémé à Bétérou ont été faites. Cependant certains auteurs ont abordé la problématique. C'est le cas de l'étude de l'impact du changement climatique sur la dynamique des bassins de l'Ouémé menée par Biao (2017). Le résultat de cette étude montre une diminution des débits au niveaux des deux exutoires (Bonou, Bétérou) pour les trois horizons temporels (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100).

Le bassin de l'Ouémé est sujet à de nombreux cas d'inondations au cours de ces dernières décennies. Cette étude tente de répondre aux questions de recherche suivantes :

- Quelle méthode de correction de biais pouvant mieux corriger les données du modèle climatique HIRHAM5?
- Le modèle ModHyPMA est-il adapté à la simulation des débits des cours d'eau dans le bassin de l'Ouémé?

## 4. Objectif de l'étude

L'objectif global de cette étude est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la dynamique des débits du fleuve Ouémé à l'exutoire de Beterou.

Il s'agira de façon spécifique :

- d'évaluer l'efficacité des méthodes de correction de biais : ISIMIP, EQM, GQM et SCALING des précipitations du modèle climatique HIRHAM5 ;
- de simuler les débits sur la période de référence (1961-1990) avec le modèle ModHyPMA;
- d'analyser l'évolution future des débits sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 au début, au milieu et à la fin du siècle;

## 5. But de la recherche

Cette étude vise à évaluer les impacts du changement climatique sur la dynamique des débits de fleuve à Bétérou dans le climat futur afin d'amener les politiques vers de meilleurs plans d'adaptation pour une bonne gestion des ressources en eau.

## 6. Limite de l'étude :

Le modèle ModHYPMA utilisé n'a pas pris en compte l'occupation des sols.

# Chapitre 1

## Milieu de l'étude

### 1.1 Introduction

En Afrique et au Bénin en particulier, les grands fleuves comme le fleuve Ouémé subissent une forte pression démographique liée à leur situation géographique (Mama, 2010). Plusieurs activités anthropiques sont exercées le long de ces cours d'eau sans que l'on puisse clairement responsabiliser les différentes parties prenantes par une politique d'aménagement des bassins versants. Cela entraîne une dégradation des ressources naturelles et donc une perte de la diversité biologique. Ces effets pervers de la forte anthropisation sur les écosystèmes naturels associés aux risques hydro-climatiques amplifient dangereusement la dégradation écologique de nos cours d'eau indispensables pour la vie. Les régimes fluviaux enregistrent des variations interannuelles très sensibles avec pour corollaire les inondations et l'assèchement des lits. Alors quel que soit le type d'événement climatique (inondations ou sécheresses), la vie des écosystèmes n'est pas épargnée. Ces dernières années, le bassin de l'Ouémé à Bétérou est confrontée à de fortes crues et des inondations qui ont entraîné des conséquences drastiques dont beaucoup de dégâts matériels, d'importantes pertes animales et de cultures maraîchères, de l'accès à l'eau et des maladies liées au débordement des eaux usées. De nombreuses études ont été réalisées sur la variabilité hydroclimatique dans le bassin sans pour autant aborder de façon objective son implication sur la dynamique écologique. Par exemple, la survenance des crues liée aux événements pluvieux extrêmes cause d'énormes dégâts à leur passage, dont la destruction des champs de cultures, des habitations, la dégradation précoce de l'environnement comme le ravinement des versants. A cet effet, la dynamique hydro-écologique des cours d'eau, souvent très complexe dans un environnement de plus en plus anthropisé couplée à une récession climatique rend de plus en plus vulnérable les écosystèmes comme c'est le cas du fleuve Ouémé. Notre but consiste dans cette partie de l'étude à décrire tout les facteurs caractérisant le milieu d'étude qu'est le fleuve Ouémé à Bétérou.



« sol supérieur » et « sol inférieur ». Le solde des entrées (infiltration) et des sorties (évaporation, percolation au travers de l'horizon argileux et drainage vers le marigot des nappes perchées qui se forment au-dessus de l'horizon argileux) des pluies constitue le stock d'eau du sol "supérieur". Le solde des volumes entrant par percolation dans les horizons inférieurs du sol et des volumes sortant par drainage vers le marigot est appelé recharge des nappes souterraines.

Le haut bassin de l'Ouémé repose sur un socle fracturé granito-gneissique dit dahoméen constitué essentiellement de migmatites et gneiss (Faure et Volkoff, 1998). Ainsi, ce socle est altéré, fracturé et fissuré dans sa partie supérieure puis de moins en moins en profondeur et agit comme un réservoir de stockage, avec une transmissivité faible de l'ordre de  $10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Kamagate2006)

## 1.4 Végétation

Selon (Bigot et al., 2005), 5 ou 6 types différents d'occupation des sols ont été observés au niveau de l'exutoire Bétérou. Ainsi, la végétation typique de la zone est la savane arborée. On y trouve également d'autres états dégradés de la forêt claire naturelle : savane arbustive, jachère, cultures, zones ouvertes. Actuellement les couverts végétaux sont en pleine évolution du fait de l'anthropisation croissante de la zone : les forêts sont de plus en plus défrichées (par brûlis) au profit de culture de rente (coton) ou vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, riz). Aussi, on tend de plus en plus vers la savane qui montre une forte évaporation et des pertes d'interception accompagnées d'une forte capacité de stockage en raison des horizons du sol plus épais parce que l'érosion est moins prononcée sur ces secteurs avec pour conséquence un écoulement lent de surface (Giertz and Diekkrüger, 2003). Il faut également remarquer la forte végétalisation des lits majeurs des rivières, à l'origine des forêts galeries.

## 1.5 Climat et hydrographie

La mousson ouest africaine est une réponse dynamique de l'atmosphère au contraste entre l'océan et les surfaces continentales sous les latitudes tropicales. Le régime pluviométrique, comme pour toute l'Afrique de l'Ouest, est contrôlé principalement par la circulation de deux masses d'air et par leur mouvement saisonnier : l'Harmattan sec (alizé continental venant du Nord Est) et la mousson humide (alizé maritime austral).

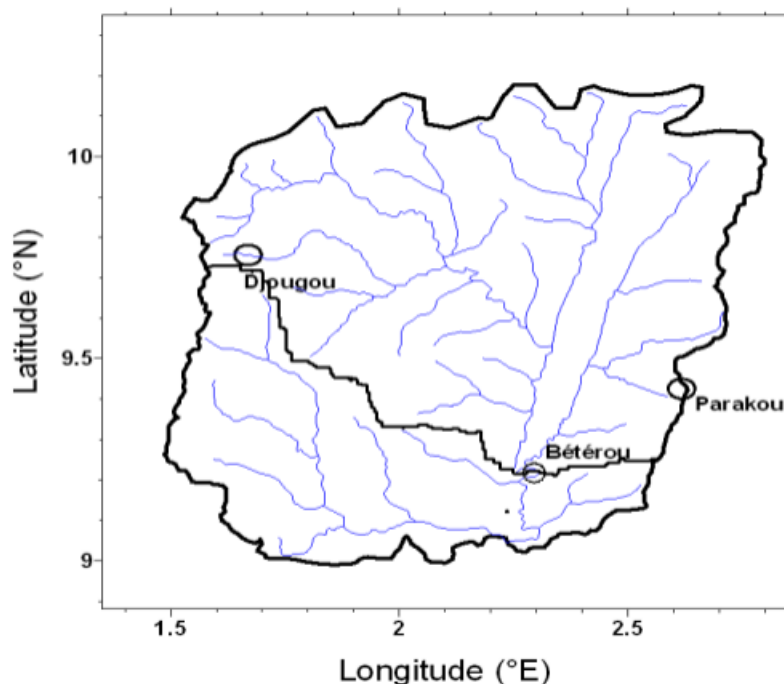


FIGURE 1.2 – Hydrographie du fleuve Ouémé à Bétérou ( Adamou,2010)

En Afrique de l'Ouest, la variabilité spatiale des champs pluviométriques est très forte sur une large gamme d'échelles temporelles. Les études ont montré que cette variabilité était largement contrôlée par la fréquence d'occurrence de gros systèmes convectifs qui produisent près de 80% du couvert nuageux et de la pluie (Mathon et Laurent, 2001) et par la variabilité interne des champs pluvieux associés (Lebel et Amani, 1999). Il est donc essentiel de disposer d'une représentation réaliste des champs de pluie associés à ces systèmes convectifs si l'on veut rendre compte de la réponse des systèmes hydrologiques au forçage pluviométrique. On note une irrégularité interannuelle et une grande hétérogénéité spatiale des précipitations. Plus au Sud, on distingue un climat tropical humide et un climat tropical sec. Le premier est caractérisé par deux saisons de pluies et deux saisons sèches (globalement une grande saison sèche, entre novembre et avril et une petite saison sèche en août et septembre). Ce type de climat se retrouve le long du Golfe de Guinée, allant de la République de Guinée jusqu'au Nigeria (Mahé et al., 1997 cité par Atindogbé, 2007). Le régime pluviométrique de la fenêtre géographique AMMA-CATCH est contrôlé principalement comme pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, par la circulation atmosphérique de deux masses d'air et par leur mouvement saisonnier : l'Harmattan sec (alizé continental venant du nord Est) et la mousson humide. On distingue alors une saison sèche et une saison humide, dont les durées et le fonctionnement varient selon les zones, l'influence de l'Harmattan étant d'autant plus importante qu'on monte vers le Nord. Ainsi le régime pluviométrique du haut bassin de l'Ouémé est caractérisé par une saison des pluies d'avril à octobre et une saison sèche de 5 mois, de novembre à mars (Le Barbé et al., 1993).

## 1.6 Types de sols et occupation des terres

### 1.6.1 L'occupation du sol de 1978

La Figure 1.3 présente la carte d'occupation du sol, réalisée à partir de l'interprétation des photographies aériennes de la mission de 1978 à l'échelle de 1/50 000e, obtenues au CENATEL. Il est observé une prédominance des formations de forêt claire et de savane boisée (62 %) qui sont réparties du nord au sud du bassin. Viennent ensuite les savanes arborées et arbustives (26 %), dominantes à l'ouest et au sud est du bassin. Quelques unités sont aussi rencontrées au centre du fleuve Ouémé à Bétérou. Les mosaïques de cultures et jachères (5 %) dominent à l'est, à l'ouest et sur une partie du sud du bassin. Mais la forêt dense (2 %) est plus répandue sur une partie du centre, du nord ouest, du sud et de l'est tandis que les galeries forestières (3 %) sont plus répandues sur le bassin au sud et au nord est et en particulier le long des cours d'eau. Les agglomérations sont plus concentrées à Djougou, N'dali et à Parakou (Tourou) dans le bassin. Les plans d'eau sont presque inexistants et occupent 0 % de la superficie totale du bassin. Quelques plantations s'observent dans le bassin. Les formations de cultures et jachères (6 %) sont surtout répandues à l'est, à l'ouest, au sud et de petites unités au centre du bassin. Par ailleurs, la savane saxicole est présente au nord et au sud du bassin.

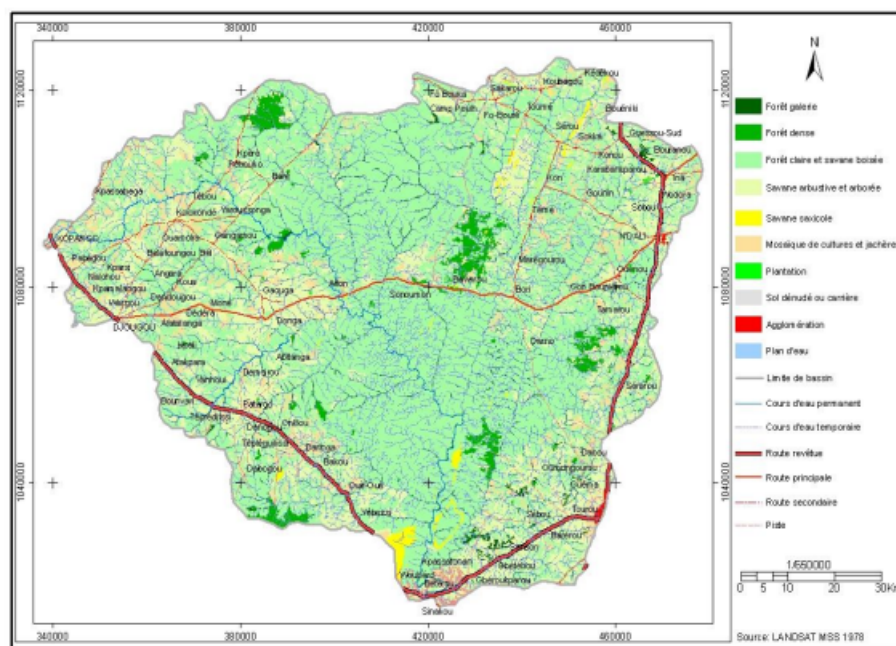


FIGURE 1.3 – Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 1978 (Akogongbe et al, 2014 )

### 1.6.2 L'occupation du sol de 1998

- La Figure 1.4 réalisée à partir des images satellitales LANDSAT TM de 1998 à l'échelle de 1/100 000e, présente la carte d'occupation du sol. En 1998, les savanes à emprises agricoles sont les formations dominantes (30 %) et sont répandues à l'est, à l'ouest, au sud et sur une partie du sud du bassin avec des plantations plus nombreuses sur le bassin. Les

forêts claires et savanes boisées (25 %) viennent en seconde position et sont répandues sur le centre est du bassin. Les cultures et jachères quant à elles occupent la troisième place (22 %) et dominent à l'est, à l'ouest en grande partie et sur une partie du sud du bassin. La savane arborée et arbustive (19 %) couvre la majeure partie du bassin. Les galeries forestières (3 %) et sont étendues le long des cours d'eau. Les agglomérations quant à elles, sont de plus en plus concentrées à Djougou, à N'dali, Ouénou et à Parakou (Tourou) dans le bassin. Aussi, la savane saxicole est toujours présente au nord et au sud du bassin. Quant à la forêt dense, elle est toujours répandue sur une partie du centre, du nord-ouest, du sud et de l'est (Akognongbe et al , 2014)

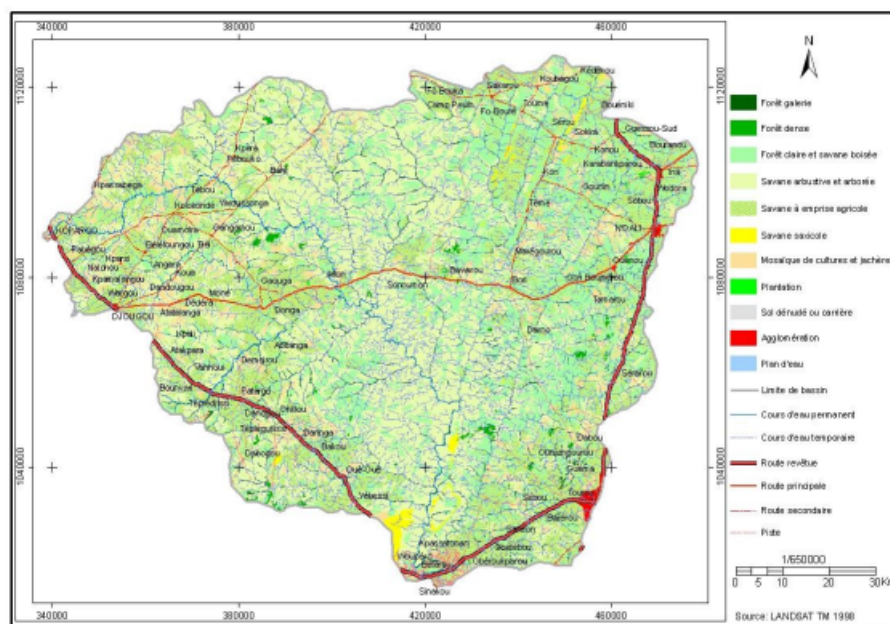


FIGURE 1.4 – Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 1998 (Akognongbe et al,2014)

### 1.6.3 L'occupation du sol de 2010

La Figure 1.5 présente les superficies des unités paysagiques en 2010 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Elle a été réalisée à partir des images satellitales LANDSAT TM de 2010 à l'échelle de 1/100 000e, obtenue au CENATEL. Les étendues de cultures et de jachères (65 %) sont présentes un peu partout dans le bassin, dominant surtout à l'ouest, à l'est, au nord-est au sud et sur une partie du sud. Les forêts claires et savanes boisées la deuxième place (19 %) et couvrent essentiellement le bassin du centre au nord du bassin et dans la partie sud du bassin. Les savanes arborées et arbustives, occupent la troisième place (12 %) et s'étendent sur presque tout le bassin. Les forêts-galeries (3 %) et les plantations sont aussi présentes sur le bassin. Par ailleurs, les agglomérations ont aussi évolué dans le bassin et sont de plus en plus concentrées à Djougou, à N'dali, à Ouénou, à Parakou (Tourou) et à Ina. L'anthropisation des milieux est donc très forte dans ces localités du bassin. Comparée à la situation de 1978, et 1998, on constate qu'en 2010, les superficies des formations naturelles ont diminué et que la superficie des agglomérations a beaucoup progressé.



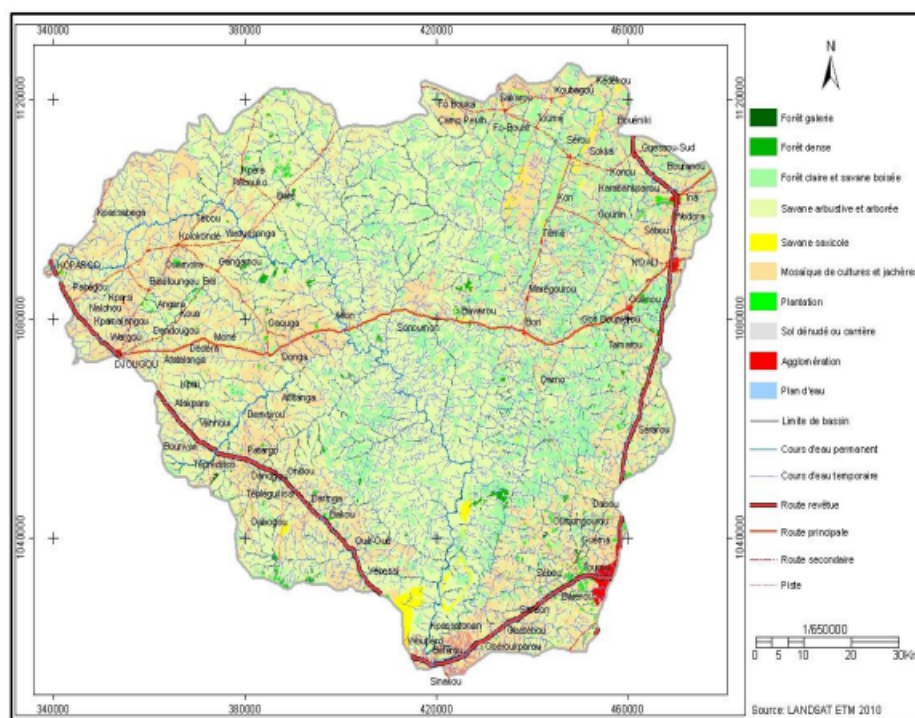


FIGURE 1.5 – Cartographie de l'occupation du sol du bassin de l'Ouémé à l'exutoire Bétérou en 2010 (Akongnongbe et al, 2014)

TABLE 1.1 – Etat de l'occupation de sol en 1978 et en 2010 (Source CENATEL)

Type d'occupation	État en 1978		État en 2010		Progression (1978-2010)	Régression (1978-2010)
	En ha	%	En ha	%	En ha	En ha
Savane arborée et savane arbustive	260599	25,80%	120505	11,93%	-	-140094
Forêt claire et savane boisée arborée	631005	62,47%	187299	18,54%	-	-443706
Forêt galerie	29250	2,90%	26179	2,59%	-	-3071
Forêt dense	24361	2,41%	26179	0,37%	-	-20640
Culture et jachères	55013	5,45%	3721	65,05%	602000	-
Plantation	730	0,07%	657013	0,29%	2213	-
Agglomération	2026	0,20%	2943	0,53%	3281	-
Savane Saxicole	7057	0,70%	5307	0,70%	0	-
Plan d'eau	4	0,00%	4	0,00%	0	-
Sol dénudé	28	0,00%	45	0,00%	17	-
Savane à emprise agricole		0,00%		0,00%	0	-
Total	1010073	100,00%	1010073	100,00%		

## 1.7 Activité socio-économique

On dénombre une population 15.316 habitants à Bétérou. L'agriculture est l'activité majeure qui occupe environ 60% de cette population (Alimi et al., 2015). Cette agriculture est essentiellement pluviale ce qui l'expose aux chocs climatiques. Une des caractéristiques des exploitations agricoles familiales dominantes dans le bassin de l'Ouémé est la pratique quasi systématique par 60% des ménages du petit élevage comprenant la volaille, et les petits ruminants, notamment les caprins et les ovins. Selon Alimi et al. (2015), l'agriculture est suivie des activités de commerce et de restauration (19,4%). L'économie de la région repose aussi sur le commerce avec le Nigéria. En outre, presque toutes les communes du bassin de l'Ouémé sont prisées par les éleveurs transhumants en provenance du Nigeria et du Niger (ANOPER, 2014). En effet, ce bassin présente des ressources fourragères et des ressources en eau favorables à l'élevage. Le bassin de l'Ouémé est le plus grand et le plus peuplé des quatre bassins hydrologiques du Bénin. Il abrite près de 44 % de la population béninoise. Cette population exerce une plus grande pression sur les terres et conduit à la conversion des zones de végétations naturelles en terres agricoles et zones d'habitation. La végétation a un effet atténuateur sur les inondations en ce sens que les forêts et savanes favorisent l'infiltration et l'évapotranspiration réelle, limitent le ruissellement et l'érosion, et par ricochet les inondations. Cette conversion des forêts et savanes en terres agricoles se traduit par une baisse de la capacité d'infiltration des sols. La conversion des forêts en terres agricoles influe également sur le cycle hydrologique et conduit dans certains cas à l'atteinte rapide des étiages de certains cours d'eau. Les impacts du changement d'affectation des terres, amplifiés par ceux des changements climatiques semblent exposer les populations à la fois aux risques d'inondations et aux pénuries d'eau. A l'échelle annuelle, le bassin de l'Ouémé semble disposer suffisamment de ressources en eau. Cette disponibilité est cependant soumise à une variabilité saisonnière. En effet, pendant la saison sèche, les sources alternatives tarissent de même que les puits et forages peu profonds qui sont les principales sources d'approvisionnement en eau potable<sup>1</sup> (IGIP-AFRIQUE, 2017). En effet, des exemples d'assèchement saisonnier (de novembre à avril) de barrages, de forages et de puits peu profonds ont récemment affecté les populations de Djougou, Dassa-Zoumè, et Parakou (Figure 2). En outre, une partie de la ressource disponible est impropre à l'utilisation car polluée par les déchets ménagers, industriels, les pesticides et les résidus d'engrais. Le fluorure émanant des interactions eau roche (c'est à dire d'origine géologique) et présent dans la zone centrale du Bassin de l'Ouémé (Bantè, Dassa-Zoumé, Glazoué, Ouèssè, Savalou et Savè) constitue une menace sérieuse à la qualité de l'eau souterraine (Tossou et al., 2017). La transhumance animale en provenance des pays voisins (par exemple, le Niger et le Nigeria) augmente la pression sur la végétation et les ressources en eau et favorise les conflits liés à l'eau dans le bassin et le delta de l'Ouémé (Alimi et al., 2015).



PHOTO 1.1 - Pénurie d'eau dans un village de Parakou (PAS-PNA BENIN ,2019)

## 1.8 Conclusion

Les activités socio-économiques menées autour du fleuve Ouémé à Bétérou sont basées essentiellement sur les activités du secteur primaire, notamment l'agriculture et surtout la pêche (Alimi et al, 2015). La géologie de Bétérou est caractérisée par un socle fracturé granito-gneissique dit dahoméen constitué essentiellement de migmatites et gneiss. Les sols sont ferrugineux et se caractérisent par une stratification marquée. Un premier horizon argileux, relativement imperméable s'observe à une profondeur de l'ordre d'un mètre. La profondeur de cet horizon, ses caractéristiques hydrodynamiques ainsi que celle des horizons qui le surmontent, sont les principaux facteurs contrôlant le stock d'eau présent dans le sol, la production des écoulements et la recharge des nappes souterraines.

# Chapitre 2

## Données, matériel et méthodes

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les données collectées spécifiquement pour l'étude. Nous ferons également mention des caractéristiques de ces données. Nous décrirons les différents matériels utilisés pour cette étude. Nous expliquerons enfin les méthodes utilisées pour analyser les données, des modèles mathématiques, des outils de visualisation, etc. Nous décrirons enfin les différents matériels utilisés pour cette étude pour le traitement des données.

### 2.2 Données

Les données météorologiques observées (données pluviométriques quotidiennes et évapotranspiration potentielle journalière, calculées par la formule de Penman) et les données de débits journaliers ont été fournies par l'Agence Nationale de Météorologie du Bénin(Météo-Bénin). Les données pluviométriques de projections historiques et futures (scénarios RCP4.5 et RCP8.5) du modèle climatique régional (DMI-HIRHAM5) a été obtenues du projet CORDEX Afrique (<http://www.cordex.org>). Ce MRC a été choisi pour tester leur capacité à reproduire les données pluviométriques observées dans le bassin versant de l'Ouémé pour les études d'impact, puisque seules les données REMO sont habituellement utilisées pour les études d'impact sur le bassin versant de l'Ouémé. La période de référence choisie pour examiner le biais pluviométrique était la période 1961-1990 (période de référence). Cette période est considérée comme la période normale standard de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Pour les projections futures, les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont considérés sur la période 2011-2100. Le RCP4.5 est un scénario de stabilisation, il est choisi car il représente un peu le RCP moyen-bas (voies de concentration représentatives). Quant à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre RCP8.5 au fil du temps, son choix repose sur le fait qu'il reflète l'impact du changement climatique potentiel le plus important. La période de référence 1961-1990 a été utilisée pour représenter la climatologie « actuelle » des zones d'étude. Les scénarios climatiques étaient centrés sur trois périodes : les années 2020 (2011-2040), les années 2050 (2041-2070) et les années 2080 (2071-2100), représentant

respectivement le début, le milieu et la fin du 21<sup>e</sup> siècle. La simulation HIRHAM5 a été forcée avec les données des modèles climatiques mondiaux GFDL-ESMLM et EC-EARTH.

## 2.3 Matériels

Nous ferons l'effort de présenter l'ensemble des matériels que nous avons utilisé dans le cadre de notre étude.

### Hardware

Les estimations et les tests ont été effectués sur un ordinateur dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Système d'exploitation : Windows 10 Professionnel
- Architecture : 64 bits
- Processeur : Intel(R) Core i5(TM) i7-8665U CPU @1,90GHz 2,11GHz
- Mémoire RAM : 8 Go

### Outils d'implémentation

Dans cette section, nous parlons des différents langages de programmation et logiciels que nous avons utilisés pour l'aboutissement de cette étude. Les outils d'implémentation que nous avons utilisé dans le travail sont :

### Langage R

R est un langage de programmation dédié à l'analyse statistique. Intégré dans un environnement spécifique, il met à disposition des utilisateurs une grande variété de techniques statistiques et graphiques. Les packages que nous avons exploité dans R sont : xts, hyfo, readxl, hydroTSM, ggplot2, reshape2, zoo, lubridate, scales, tidyr, trend, tidyverse, Metrics, dplyr.

### Logiciel Excel

Excel est un logiciel de la suite bureautique Office de Microsoft et permet la création de tableaux, de calculs automatisés, de plannings, de graphiques et de bases de données. Nous avons utilisé le logiciel Microsoft Excel pour le traitement des données et leur extraction des documents. Nous avons utilisé Excel également pour exporter les données vers le logiciel R

## 2.4 Méthodes

Dans cette partie, nous avons procédé en amont au nettoyage des données qui est un processus qui vise à identifier et corriger les données altérées, inexacts ou non pertinentes. Cette étape fondamentale du traitement des données améliore la cohérence, fiabilité et valeur des données.

### 2.4.1 Qualité et données observées

Les données fournies par Météo-Bénin sont des données de précipitation journalières.. Pour arriver à terme, nous avons en amont veiller à la qualité de ces données à travers la recherche des biais et les données manquantes.

#### Correction de biais

En raison du biais bien connu des résultats du modèle climatique, quatre méthodes de correction du biais sont appliquée pour corriger la simulation RCM (DMI-HIRHAM5 ) pour le climat actuel et futur. Dans cette étude, nous avons appliqué les méthodes de correction de biais EQM ,SCALING,ISIMIP et GQM pour améliorer la convivialité des projections du modèle climatique régional pour les études d'impacts hydrologiques du changement climatique .

#### Les méthodes de correction de biais utilisées

##### Scaling

L'approche SCL : scaling ou mise à l'échelle linéaire est basée sur le terme multiplicatif, qui permet d'ajuster les biais. dans le modèle par accord entre la moyenne mensuelle des précipitations de valeurs corrigées et celle d'observation (Lenderink et al., 2007). Cette approche vise à faire correspondre exactement les précipitations moyennes mensuelles observées et corrigées. Dans un premier temps, le facteur d'échelle mensuel est calculé comme un rapport de la moyenne mensuelle à long terme des données et données de contrôle (données de modèle pour la période historique). Dans la deuxième étape, chacune des valeurs quotidiennes des précipitations modélisées non corrigées pour un mois spécifique sont multipliées par le facteur d'échelle mensuel de ce mois spécifique. Mathématiquement, la méthode peut s'énoncer comme suit :

$$Pd_{BC} = Pd_{mod} \frac{[\mu_m(Pd_{obs})]}{[\mu_m(Pd_{mod})]} \quad (2.1)$$

##### EQM

En général, les méthodes QM mettent en œuvre des transformations statistiques pour le post-traitement des résultats de la modélisation climatique. Les transformations statistiques consistent à transformer les fonctions de distribution des variables modélisées en celles observées à l'aide d'une fonction mathématique, qui peut être mathématiquement exprimée comme ( Piani et al. 2010b ) :

$$x^0 = f(x^m) \quad (2.2)$$

dans lequel :

- $x^0$  est la variable observée;
- $x^m$  est la variable modélisée;

- $f()$  est la fonction de transformation.

Étant donné que les méthodes QM utilisent la relation quantile-quantile pour faire converger la fonction de distribution des variables simulées vers celle observée, il convient de noter qu'avec les CDF des séries temporelles des variables observées et simulées, leur relation quantile peut également être déterminée, comme ci-dessous :

$$x^0 = F_o^{-1} [F_m(x^m)] \quad (2.3)$$

où

- $F_m(x^m)$  est le CDF de  $x_m$  ;
- $F_o^{-1}[]$  est la forme inverse du CDF de  $x^0$  , qui est techniquement appelée fonction quantile.

### GQM

Cette méthode consiste à ajuster les quantiles de la distribution simulée aux quantiles correspondants de la distribution observée. Elle est basée sur l'hypothèse que les écarts entre les quantiles observés et simulés sont distribués selon une distribution gamma.

$$f_\gamma\left(\frac{x}{\alpha, \beta}\right) = x^{\alpha-1} \times \frac{1}{(\beta^\alpha \times \gamma(\alpha))} \times e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{avec } x \geq 0, \alpha, \beta > 0 \quad (2.4)$$

où  $\alpha$  est le paramètre de forme et  $\beta$  est le paramètre d'échelle.

### ISIMIP

L'approche ISI-MIP préserve les changements relatifs pour les précipitations moyennes mensuelles. Deux versions de cette méthode BC sont décrites : l'approche FAST-TRACK et l'approche étendue. Dans cette étude, c'est ce dernier qui est appliqué. Cela implique l'ajustement de la variabilité journalière en utilisant une méthode non linéaire. L'option linéaire est choisie si l'ajustement non linéaire n'offre pas un meilleur résultat qu'un ajustement linéaire. La procédure de correction s'effectue comme suit :

Dans un premier temps, les valeurs moyennes mensuelles à long terme sont ajustées de la même manière que pour la méthode de mise à l'échelle linéaire c'est-à-dire SCALING. Dans un deuxième temps, la fréquence des jours de pluie est ajustée. Un seuil de jours de pluie est défini à partir de Phist analogue à la procédure de la méthode LOCI.

Les seuils sont fixés à zéro, ce qui peut réduire les précipitations mensuelles. Les nombres de jours secs d'un mois spécifique dans une année spécifique est redistribué uniformément sur les jours humides.

Les étapes trois et quatre impliquent la correction de l'intensité des précipitations les jours pluvieux. Donc, à la troisième étape, les valeurs d'un mois spécifique sont normalisées par la moyenne de ce mois :

$$P^{**}(d) = P^*(d) \frac{P^*(d)}{\mu(P^*(i, j))} \quad (2.5)$$

où

- $P^{**}$  est la série temporelle normalisée,

- $P^*$  indique la série temporelle après les ajustements jusqu'au deuxième étape et  $j$  est l'année (1...30).

La redistribution des précipitations les jours secs ainsi que la normalisation est également effectuée pour Pobs. Dans la quatrième étape de l'approche étendue, une fonction de transfert non linéaire est dérivée des valeurs normalisée provenant à la fois de Pobs :

$$g(P_{hist}^{***}(i)) = [a(i) + b(i) \times \{P_{hist}^{***}(i) - \min(P_{hist}^{***}(i))\}] \times \left[ 1 - e^{-\frac{(P_{hist}^{***}(i) - \min(P_{hist}^{***}(i)))}{\pi(i)}} \right] \quad (2.6)$$

où

- $P_{hist}^{***}$  sont les données classées et normalisées provenant de Phist ,
- $a$  est le décalage et  $b$  est la pente de la partie linéaire de la fonction,
- $\pi$  est un paramètre de la partie exponentielle.

Tous les trois paramètres doivent être ajustés.

Enfin, la correction est complétée en multipliant la moyenne d'un mois spécifique par la valeur de la fonction transfert pour un jour précis :

$$P_{bc} = \mu(P^*(i, j)) \times g(P_{hist}^{***}(d)) \quad (2.7)$$

Nous avons présenté ci-dessus, les différentes méthodes utilisées pour la correction des biais. La prochaine étape consistera à vous présenter les différents critères utilisés pour évaluer la performance de ces méthodes.

### Métriques de performance

L'approche SCL : scaling ou mise à l'échelle linéaire est basée sur le terme multiplicatif, qui permet d'ajuster les biais. dans le modèle par accord entre la moyenne mensuelle des précipitations de valeurs corrigées et celle d'observation (Lenderink et al., 2007). Cette approche vise à faire correspondre exactement les précipitations moyennes mensuelles observées et corrigées. Dans un premier temps, le facteur d'échelle mensuel est calculé comme un rapport de la moyenne mensuelle à long terme des données et données de contrôle (données de modèle pour la période historique). Dans la deuxième étape, chacune des valeurs quotidiennes des précipitations modélisées non corrigées pour un mois spécifique sont multipliées par le facteur d'échelle mensuel de ce mois spécifique.

### MAE

Le MAE indique les différences moyennes entre les valeurs simulées et les valeurs réelles et revient au calcul de la moyenne des erreurs absolues.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.8)$$

**RMSE** Le RMSE représente la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes entre les prédictions et les valeurs réelles. Contrairement au MAE, le RMSE attribue un poids



plus élevé aux erreurs importantes puisque les différences entre les valeurs réelles et les prédictions sont d'abord élevées au carré puis moyennées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y_t - \hat{y}_t|^2} \quad (2.9)$$

### 2.4.2 Description du modèle choisi pour l'estimation des débits (ModHyPMA)

Pour modéliser les débits du fleuve Ouémé à Bétérou, le modèle hydrologique ModHyPMA a été utilisé. Conçu à partir du Principe de Moindre Action, ModHyPMA (Modèle Hydrologique basé sur le Principe de Moindre Action) utilise le principe de la dépense minimum d'énergie. Ce principe peut être énoncé comme suit : "La nature suit toujours les voies les plus simples ... et les voies les plus simples sont celles qui minimisent la dépense de la nature en énergie (Afouda et al. 2004, Alamou 2011). C'est un modèle hydrologique global basé sur la physique et à deux paramètres. Nous avons utilisé pour ce modèle, les données quotidiennes (c'est-à-dire les données quotidiennes sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle quotidienne) comme entrée. Ensuite, MODHYPMA été calibré pour le débit journalier moyen du bassin versant de Bétérou pour la période 1961-1966 et validé pour la période 1974-1979.

#### Processus de transformation Pluie-débit

La plupart des modèles hydrologiques que l'on rencontre dans les applications opérationnelles sont des modèles conceptuels du type GRmn  $m \in \{2,3,4,5\}$  désigne le nombre de paramètres à optimiser et  $n \in H, J, M$  désigne le pas de temps pouvant être horaire, journalier ou mensuel. Il est donc naturel de chercher à savoir si le modèle basé sur le principe de moindre action peut servir dans le cadre d'une application opérationnelle.

Nous allons faire à présent la mise en œuvre du modèle, en considérant la version unidimensionnelle, où seule la variation dans le temps est prise en compte. Dans ce cas, l'équation d'Euler-Lagrange s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = \nu Q^{2\nu-1} \quad (2.10)$$

En utilisant l'expression du débit  $q = q(t)$ , on peut déduire les équations suivantes :

$$\frac{dZ(q, t)}{dt} = \Psi(q, t) \quad (2.11)$$

$$\frac{d(\lambda Q)}{dt} + \nu Q^{2\nu-1} = \Psi(q, t) \quad (2.12)$$

Avec les notations :

$$K = kl^{b_1} S^{b_2} I_0^{b_3} \quad (2.13)$$

$$\lambda = -\frac{f(\log K)}{dt} \quad (2.14)$$

$$Z = K \frac{dq^{b_4}}{dt} \quad (2.15)$$

En clair  $\lambda$  est un paramètre macroscopique décrivant des propriétés émergentes liées à la géomorphologie et à la pédologie du bassin versant

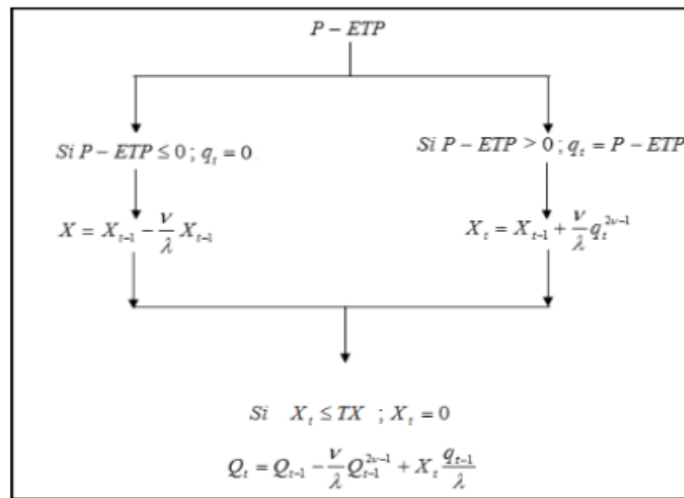


FIGURE 2.1 – Structure Schématique de ModHYPMA (Biao,2017)

$Q$  est le débit à l'exutoire du bassin versant,  $\nu$  est un paramètre de non-linéarité,  $\lambda$  est le coefficient de tarissement du bassin,  $q$  est égale à la différence entre la pluie et l'ETP tous mesurés pendant un temps  $t$  et  $\Psi$  est une fonction.

### Détermination des paramètres $\lambda, \nu$

Pour la recherche d'une solution numérique, on considère le cas où  $\lambda$  et  $\nu$  sont des constantes. L'équation s'écrit sous la forme :

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{\nu}{\lambda} Q^{2\nu-1} = \frac{X(t)}{\lambda} q(t) \quad (2.16)$$

Pour choisir une formulation discrète de cette équation on adopte un point de vue markovien en considérant que le débit que l'on mesure à l'exutoire du bassin versant au jour  $t$  dépend du débit mesuré au jour  $(t - 1)$ , mais aussi de l'état du bassin le jour  $t$  tel qu'il a été modifié par l'état pluvieux ou non du jour  $(t - 1)$ . L'équation (4.44) s'écrit alors sous la forme suivante :

$$Q_t - Q_{t-1} + \frac{\nu}{\lambda} Q_{t-1}^{2\nu-1} = \frac{X(t)}{\lambda} q_{t-1} \quad (2.17)$$

$Q_t$  et  $Q_{t-1}$  désignent respectivement les débits à l'exutoire de bassin versant aux dates  $t$  et  $(t-1)$ ;  $Q_t$  décrit l'état du bassin au jour  $t$  et  $q_{t-1}$  l'état pluvieux ou non du jour  $(t-1)$ .

On en déduit :

$$Q_t = Q_{t-1} - \frac{\nu}{\lambda} Q_{t-1}^{2\nu-1} + \frac{X(t)}{\lambda} q_{t-1} \quad (2.18)$$

Etant donné que les paramètres  $\lambda$  et  $\nu$  sont considérés comme des constantes on utilisera la période de tarissement pour déterminer leurs valeurs. A noter qu'au tarissement,  $q=0$

L'équation de tarissement déduite de l'équation précédente s'écrit :

$$Q_t - Q_{t-1} = -\frac{\nu}{\lambda} Q_{t-1}^{2\nu-1} \quad (2.19)$$

Ce qui conduit à :

$$\ln(Q_t - Q_{t-1}) = \ln\left(\frac{\nu}{\lambda}\right) + (2\nu - 1) \ln(Q_{t-1}) \quad (2.20)$$

Soit en passant par

$$A = (2\nu - 1), \quad B = \ln\left(\frac{\nu}{\lambda}\right) \quad (2.21)$$

$$\ln(Q_t - Q_{t-1}) = A \ln(Q_{t-1}) + B \quad (2.22)$$

L'utilisation des débits moyens journaliers observés à l'exutoire du bassin versant pour la période de calage de 1961-1966 permet, grâce à un bon ajustement linéaire entre  $\ln(Q_t - Q_{t-1})$  et  $\ln(Q_{t-1})$  d'obtenir les valeurs de  $A$  et  $B$ . Ainsi les valeurs des paramètres du modèle sont déterminées par :

$$\begin{cases} \nu = \frac{A+1}{2} \\ \lambda = \frac{\nu}{e^B} = \frac{A+1}{2e^B} \end{cases} \quad (2.23)$$

Ces deux valeurs permettent de simuler la période de tarissement. Pour simuler les hautes eaux et l'hydrogramme entier, on calcule les valeurs de  $X_t$  en utilisant les valeurs de  $\lambda$  et  $\nu$ . On a ainsi :

$$X_t = \begin{cases} \frac{\lambda(Q_t - Q_{t-1} + e^B Q_{t-1}^A)}{q_{t-1}}, & \text{si } q_{t-1} \neq 0 \\ 0, & \text{si } q_{t-1} = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Les résultats de la transformation de l'événement pluvieux du jour (t-1) en débit à l'exutoire du bassin versant s'observe au jour t. Le schéma numérique adopté permet ainsi de prendre en compte le temps de réponse des bassins versants qui, pour les bassins versants naturels de taille moyenne en milieu tropical, est d'environ une journée.

### Méthode d'évaluation de performance de ModHYPMA

#### Le critère de Nash-Sutcliffe (ou critère de Nash) :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2.25)$$

Où  $Q_{i,obs}$  désigne le débit observé,  $Q_{i,sim}$  le débit simulé et  $\bar{Q}_{obs}$  la moyenne arithmétique de tous les événements de 1 à n du débit  $Q_{obs}$ . Lorsque  $NSE = 1$  les débits simulés et observés sont concordant. Un  $NSE = 0$  indique que les prévisions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées.  $NSE < 0$  indique que la moyenne des données observées donne une meilleure prédiction que le modèle.

#### Le coefficient de détermination $R^2$

$$Nash = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2.26)$$

$R^2$  décrit la proportion de la variance des débits observés par rapport aux débits simulés.  $R^2 > 0.5$ , on peut affirmer que le modèle simule bien.

#### Calcul du pourcentage de changement

Pour la projection hydrologique, l'hydrogramme moyen a été calculé à l'aide de 30 années de données projetées sur le débit fluvial sur chacun des trois horizons temporels (années 2020, 2050 et 2080). L'hydrogramme moyen et les changements du débit annuel de la rivière ont été comparés au débit fluvial simulé pour la période de référence plutôt qu'aux données de débit réellement observées. Cette technique a été utilisée pour éviter les erreurs systématiques que le modèle hydrologique introduirait en comparant la période de projection avec la période de référence.

Le pourcentage de changement du débit annuel moyen du fleuve a été calculé comme suit

$$\text{Pourcentage de changement} = \frac{Q_{futur} - Q_{reference}}{Q_{reference}} \times 100 \quad (2.27)$$

Où  $Q_{futur}$  représente le débit projetés pour les périodes futurs,  $Q_{reference}$  les débits simulés de la période de référence.

## **2.5 Conclusion**

Plusieurs méthodes ont été employées pour atteindre les objectifs spécifiques de la recherche. Ces différentes méthodes ont nécessités la collecte et le traitement de plusieurs types de données couvrant les périodes futures comme historiques.

## Chapitre 3

# Résultats et discussion

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des traitements et des analyses des mesures et observations. Ces résultats doivent permettre de caractériser la dynamique des débits du fleuve de l'Ouémé à Bétérou. Nous présentons d'abord l'étude sur l'évaluation des méthodes de corrections de biais utilisées pour corriger les données brutes de HIRHAM5. Par la suite, nous vous présenterons les résultats obtenus de la simulation des débits du fleuve dans la période de référence sur la base du Modèle MODHYMPA. Enfin, nous présenterons les résultats de la projection future des débits du fleuve.

### 3.2 Evaluation des méthodes de corrections de biais

La Figure 3.1 présente la courbe des précipitations moyennes mensuelles observées, les précipitations moyennes mensuelles non corrigées de HIRHAM5 et les précipitations moyennes mensuelles corrigées par la méthode d'EQM.

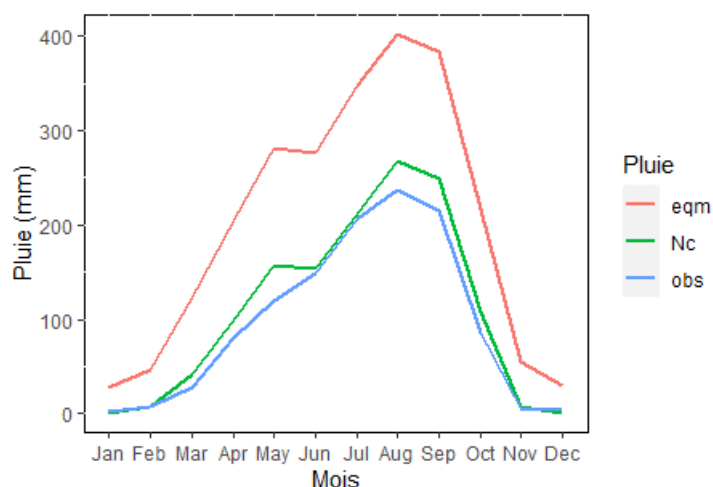


FIGURE 3.1 – Précipitations brutes, observées et corrigées (EQM) sur la période 1961-1990

La figure 3.2 présente la courbe des précipitations moyennes mensuelles observées, les précipitations moyennes mensuelles non corrigées de HIRHAM5 et les précipitations moyennes mensuelles corrigées par la méthode de SCALING. On remarque que la méthode de SCALING « mise en échelle » a bien corrigé les précipitations.

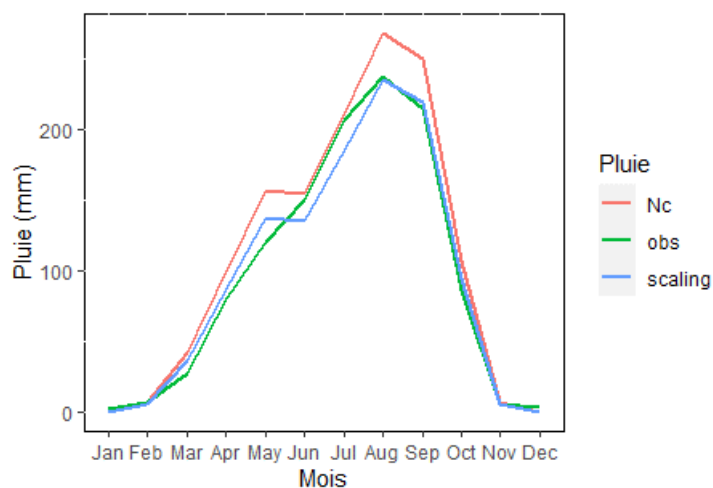


FIGURE 3.2 – Précipitations brutes, observés et corrigées (SCALING) sur la période 1961-1990

La figure 3.3 présente la courbe des précipitations moyennes mensuelles observées, les précipitations moyennes mensuelles non corrigées de HIRHAM5 et les précipitations moyennes mensuelles corrigées par la méthode de GQM.

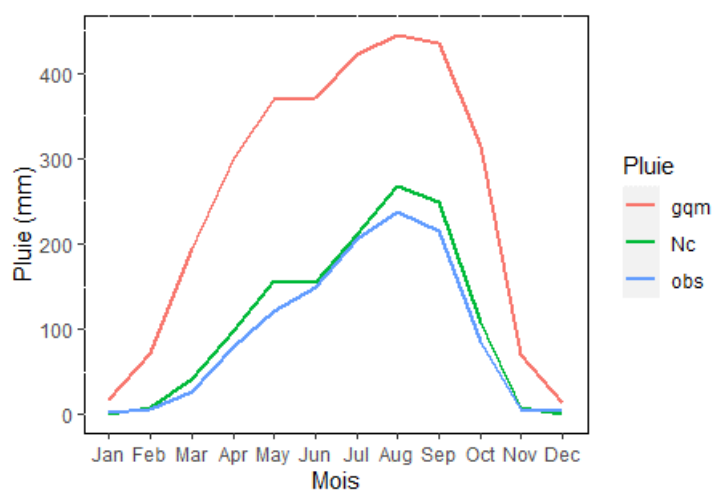


FIGURE 3.3 – Précipitations brutes, observés et corrigées (GQM) sur la période 1961-1990

La figure 3.4 présente la courbe des précipitations moyennes mensuelles observées, les précipitations moyennes mensuelles non corrigées de HIRHAM5 et les précipitations moyennes mensuelles corrigées par la méthode de ISIMIP. On remarque que la méthode ISIMIP corrige bien également les précipitations.

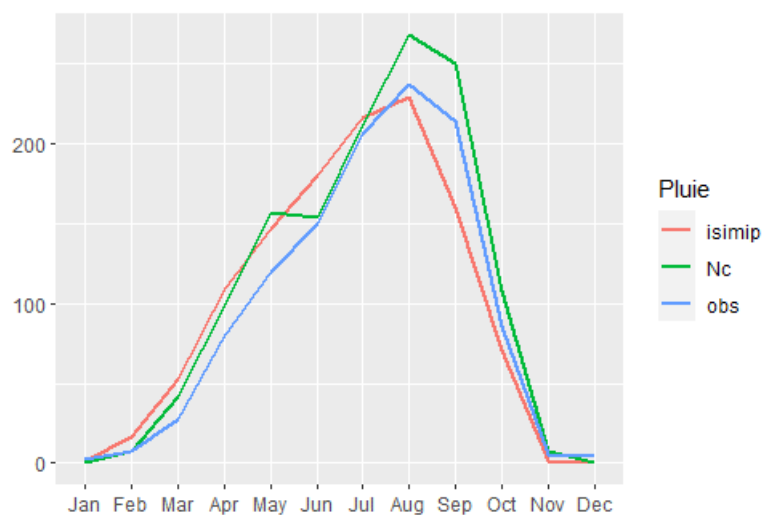


FIGURE 3.4 – Précipitations brutes, observés et corrigées (ISIMIP) sur la période 1961-1990.

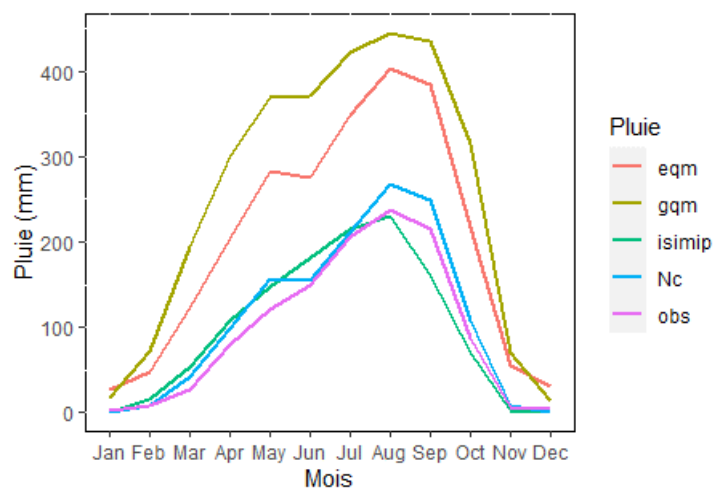


FIGURE 3.5 – Précipitations brutes, observés et corrigées (EQM,SCALING,GQM,ISIMIP) sur la période 1961-1990



TABLE 3.1 – Statistique de performance des méthodes de corrections de biais.

Méthode de correction de biais	RMSE (mn/mois)	MAE (mn/mois)
HIRHAM5 (brutes)	19,56	14,49
EQM	117,38	104,61
GQM	179,67	157,01
Scaling	9,9732	7,57
ISMIP	23,26	17,98

Les métriques de performance ont été calculés par comparaison des données brutes de HIRHAM5 et les données observées et également les données corrigées de HIRHAM5 et les données observées.

D'après le tableau, on remarque que seules les méthodes de corrections de biais SCALING et ISIMIP améliore vraiment le résultat . Au vue des différents graphiques également, il ressort que la méthode de SCALING est la méthode de correction de biais la plus performante pour cette étude. Nous avons remarqué à travers la méthode graphique que les précipitations mensuelles observées ont été sur-estimé par les données brutes .Il était vraiment nécessaire de corriger ces biais pour obtenir des données climatiques fiables pour l'étude d'impact que nous sommes entrain de mener.

### 3.3 Simulation des débits du fleuve dans la période de référence avec ModHyPMA

#### Période de Calibration (1961-1966)

Le but de la calibration est de définir la valeur de paramètres que nous ne sommes pas en mesure de mesurer ou d'estimer avec précision. Le choix de la valeur doit être basé sur celles qui permettent le meilleur accord entre simulations et observations [Deraedt, 2011]. Il est important d'utiliser les séries de données qui présentent le plus grand contraste dans les valeurs afin de couvrir le plus grand nombre de débits fluviaux [Ambroise, 1999; Grayson et Blöschl, 2000]. Cela permet de limiter au maximum l'extrapolation lors de l'utilisation du modèle. Nous avons adopté la même procédure afin d'une meilleure simulation. Les valeurs obtenues après le calibrage se présente comme suit :

TABLE 3.2 – Paramètres du calibrage du modèle MODHYPMA

Paramètres	Valeur	Constantes	Valeur
$\lambda$	15.365	P2	0.62
$\mu$	0.9689	TX	0.038

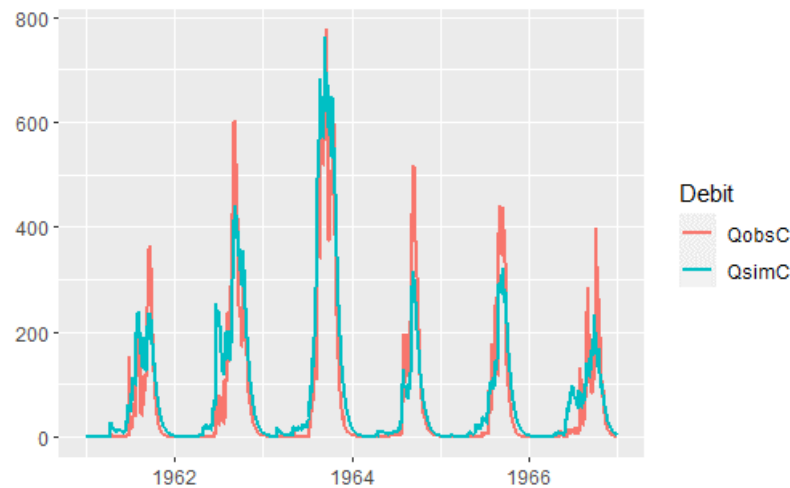


FIGURE 3.6 – Hydrogramme simulé comparé au débit observé (calage) à Bétérou

### Période de Validation (1974-1979)

La validation est l'étape qui permet de s'assurer de la qualité du modèle. En effet, le calibrage permet d'obtenir un bon jeu de paramètres favorisant ensuite une bonne simulation des données. Pour garantir que la simulation est toujours correcte, nous devons utiliser une autre série de données. Pour effectuer la validation, il est nécessaire de disposer d'une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calibrage et dont les données de sortie correspondantes sont connues. Nous avons adopté la même démarche. Les résultats se présente comme suit :

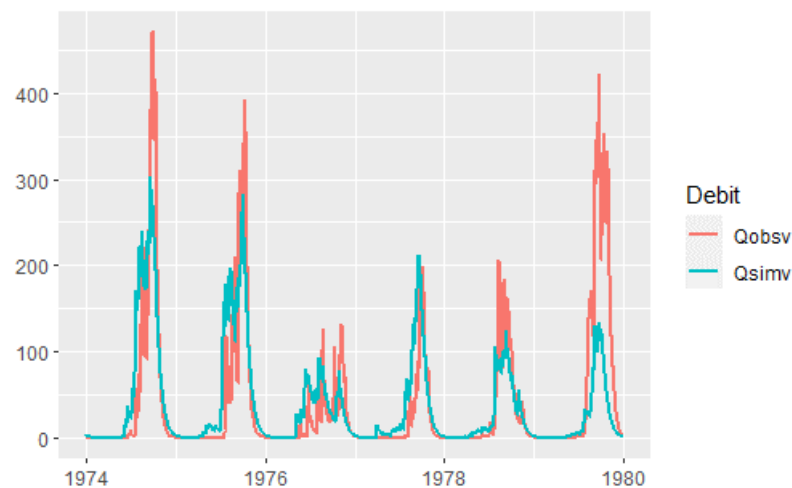


FIGURE 3.7 – Hydrogramme simulé comparé au débit observé (validation)  
Bétérou

### Récapitulatif

L'étalonnage du modèle a été effectué sur la période 1961-1966 et la validation sur la période 1974-1979. Afin d'évaluer les performances du modèle pour l'étalonnage, les critères suivants ont été pris en compte : le coefficient d'efficacité du modèle Nash, et le coefficient de détermination  $R^2$ . Nous pouvons voir que l'hydrogramme est correctement simulé par ModHYPMA. La différence entre les résultats observés et simulés peut être constatée par un simple contrôle visuel ainsi que par les valeurs numériques de Nash et  $R^2$ . Pour les périodes de calibration et de validation, le Nash est supérieur à 0,7 et pour le coefficient de détermination, il est supérieur à 0,5 au niveaux des deux périodes. Ces résultats indiquent que ModHYPMA est adapté à la simulation des débits dans le fleuve Ouémé à Bétérou et peut donc être utilisé pour la projection du débit fluvial.

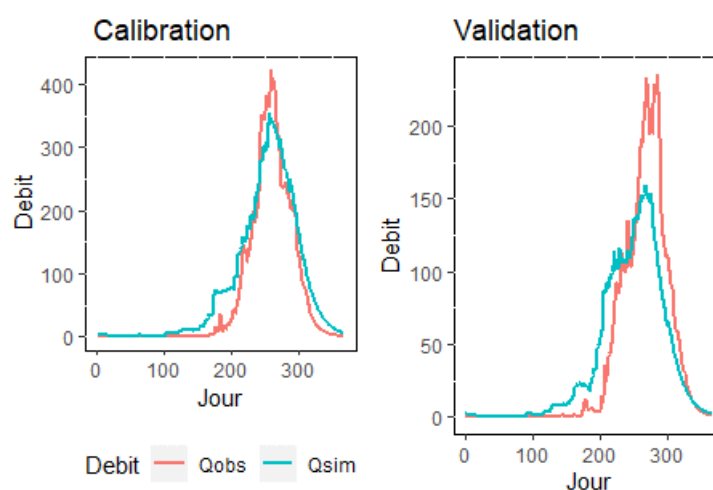


FIGURE 3.8 – Hydrogramme moyen observés et simulés par le fleuve Ouémé  
à Bétérou pour les périodes de calibration et de validation

TABLE 3.3 – Critère de performance du modèle hydrologique basé sur le principe de moindre action (MODHYPMA) pour le fleuve Ouémé à Bétérou.

	Calage	Validation
Coefficient Nash	0.7893	0.7136
R <sup>2</sup>	0.93	0.54

### 3.4 Projection futur des débits du fleuve.

La figure 3.9 nous montre que pour l'horizon 2020, la courbe des débits annuel moyens simulés est au-dessous de la courbe des débits annuels moyens de la période de référence. Le même événement s'observe à l'horizon 2050 . La courbe des débits annuels moyens simulés est au-dessous de la courbe des débits annuels moyens de la période de référence. Pour l'horizon temporel 2080, on observe un dépassement léger de la courbe des débits annuels moyens simulés par rapport à la courbe des débits annuels moyens de la période de référence

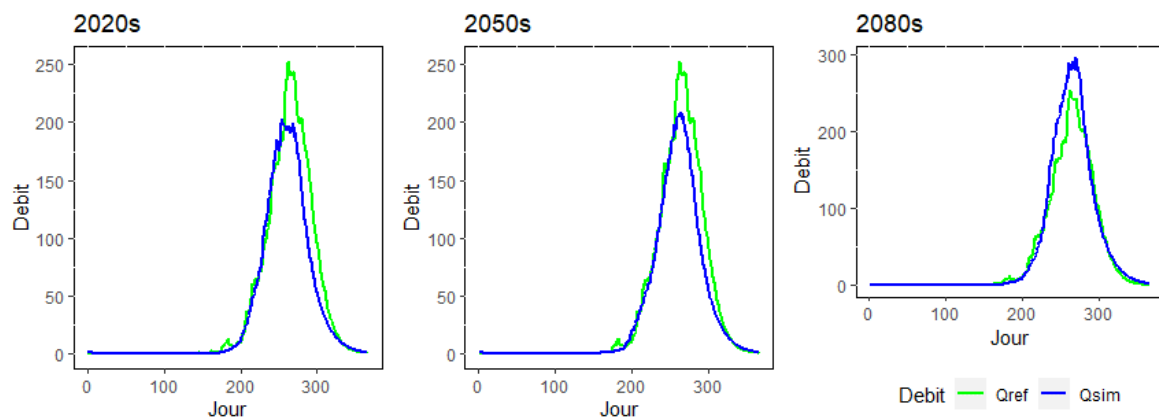


FIGURE 3.9 – Hydrogramme moyens des projections HIRHAM5 pour les horizons 2020,2050 et 2080 et la référence 1961-1990 pour le fleuve Ouémé avec les dérivés du scénarios RCP 4.5.

Le calcul des pourcentages de changement confirme nos observations. Pour la projection future basée sur les scénarios RCP4.5, le débit annuel moyen projeté en utilisant HIRHAM5 à Bétérou diminue avec une ampleur de -16 % pour les périodes de 2011-2040 et 2041-2070 et augmente de 12 % pour la période de 2071-2100.

La figure 3.10 nous montre que pour l'horizon 2020, la courbe des débits annuels moyens simulés est au-dessous de la courbe des débits annuels moyens de la période de référence. A l'horizon 2050, on observe un léger dépassement de la courbe des débits annuels moyens simulés par rapport aux débits des moyens annuel de la période de référence. Le même évènement se poursuit à l'horizon temporel 2080, où on observe un écart considérable. La courbe des débits annuels moyens simulés est au-dessus des débits annuels moyens de la période de référence.

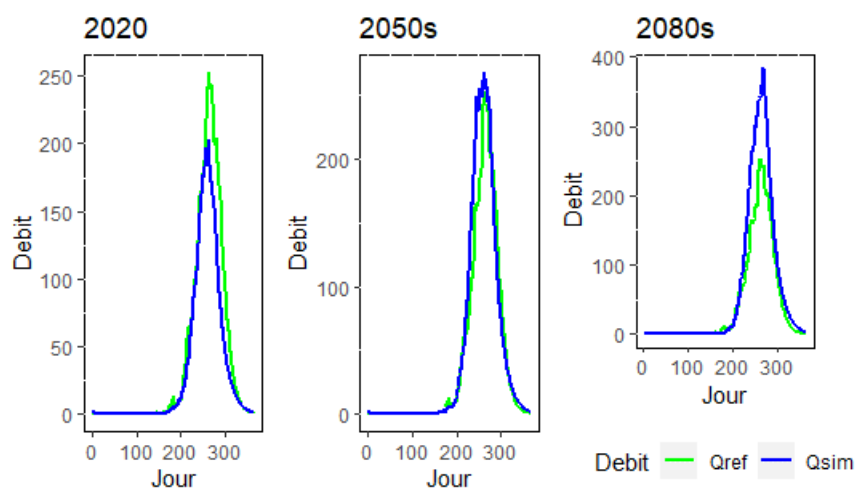


FIGURE 3.10 – Hydrogramme moyens des projections HIRHAM5 pour les horizons 2020,2050 et 2080 et la référence 1961-1990 pour le fleuve Ouémé avec les dérivés du scénarios RCP 8.5

Le calcul des changements de pourcentage confirme nos observations. La projection future basée sur les scénarios RCP8.5 nous montre que le débit annuel moyen projeté par HIRHAM5 à Bétérou diminue de -23% pour la période de 2011-2040, augmente de 12% pour la période de 2041-2070 et augmente de 44% pour la période de 2071-2100.

### 3.5 Discussion

La méthode de correction de biais SCALING donne de meilleures performances d'après les différentes comparaisons effectuées, suivie de la méthode de ISIMIP. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par Obada et al, 2016. En ce qui concerne la méthode GQM, elle a dégradé la qualité des précipitations. Ce qui nous montre que les précipitations ne suivent pas la distribution de Gamma pour ce bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Ces résultats sont conformes aux travaux de Gudmundsson et al. (2012) qui ont constaté que les méthodes paramétriques sont les moins efficaces de toutes les méthodes utilisées dans leur étude. La méthode EQM a également dégradé la qualité des précipitations. Le modèle hydrologique utilisé dans la présente étude (c.-à-d. ModHYPMA) se rapproche de manière adéquate des données climatiques historiques du modèle HIRHAM5. Bien que les prévisions globales ne constituent pas une garantie, elles devraient être plus susceptibles de simuler avec précision les conditions climatiques futures, Biao (2017). C'est pourquoi cette approche a été adoptée. L'analyse des résultats a montré qu'il faut s'attendre à une diminution du débit du fleuve de l'Ouémé à Bétérou avec le scénario RCP4.5 pour les horizons temporels 2020, 2050. Ce résultat obtenu pour ces deux horizons temporels 2020, 2050 avec le scénario RCP4.5 est cohérent avec les résultats de [Biao, 2017] qui a constaté une réduction des débits mensuels. Pour la fin du siècle c'est-à-dire l'horizon temporel 2080 avec le scénario RCP 4.5, on note une augmentation des débits. Avec le scénario RCP 8.5, on remarque une diminution des débits pour l'horizon temporel 2020 et une augmentation des débits pour les horizons 2050, 2080. Un tel résultat au niveau de l'horizon temporel 2020 pour le scénario RCP 8.5 est cohérent avec les résultats de (Biao, 2017) qui a constaté une diminution des débits. Par rapport à une possible augmentation des débits pour les horizons temporels 2050 et 2080 pour les deux scénarios, les résultats semblent diverger avec ceux de (Biao, 2017). D'après les résultats de PNA 2022, sur la projection climatique au Bénin, on note une incertitude voir un imbroglio au niveau des modèles climatiques (CSIRO, CCCma). Selon leur résultat, on note une diminution des hauteurs des précipitations annuelles à l'horizon 2050 et une augmentation à l'horizon 2070. Sauf que pour ce dernier cas, c'est-à-dire l'horizon 2070, les deux modèles affichent des résultats contraires sous le scénario RCP4.5. En ce qui concerne la température (moyenne, minimale, maximale) selon leur étude, on note une augmentation pour les deux modèles climatiques à l'horizon 2050. Une augmentation de la température et une baisse pluviométrique est responsable de la diminution du débit au niveau d'un fleuve et ceci s'explique par le fait qu'une température élevée donne de l'air chaud, qui absorbe plus d'eau sous forme de vapeur ce qui entraîne une augmentation de l'ETP. On peut affirmer selon leur étude, une tendance à une diminution des débits aux niveaux des bassins versants au Bénin à l'horizon 2050 d'où probablement une diminution des débits au niveau du débit du fleuve Ouémé à Bétérou ce qui conforte nos résultats. Par ailleurs, nous avons constaté une incertitude

des projections climatiques notamment pluviométrique à l'horizon 2070 et celle-ci due aux modèles climatiques utilisés. Des résultats qui sont conformes avec les travaux qui ont été menés dans la région de l'Afrique de l'Ouest sur le changement climatique (Sylla, M.B.; Nikiema, 2016) et (Tall, M. Sylla, M.B.; Diallo, 2016) et qui ont indiqué qu'une grande incertitude aux niveaux des précipitations (entre -10 et 10) seront observées dans le sahel jusqu'en 2100. Dans notre présente étude, l'incertitude observée au niveau de l'horizon temporel 2050 est également due au modèle climatique HIRHAM5. Le modèle HIRHAM5 est un modèle unique qui ne prend pas en compte toutes les informations climatiques et est sujet à des biais malgré l'existence d'une panoplie de méthodes de corrections de biais. C'est ce qui a poussé de nombreux auteurs à savoir : (Frei et al, 2006; Fowler et al., 2007; Tebaldi et Knutti, 2007; Dégué et al., 2012; etc) à opter pour les méthodes multi-modèles (combinaison de plusieurs modèles) pour augmenter les performances et réduire les incertitudes liées aux simulations. (Obada et al) ont également travaillé sur les méthodes multi-modèles en se basant sur les modèles HIRHAM5, RCA4 et REMO. D'après leur résultat, la combinaison des deux modèles REMO et HIRHAM5 d'une part et les trois modèles d'autre part donne de meilleur résultat.

### 3.6 Conclusion

La simulation des débits futurs du fleuve Ouémé à Bétérou indique une diminution aux horizons temporels 2020 (2021-2040), 2050 (2041-2070) et une augmentation à la fin du siècle (2071-2100) pour le scénario RCP 4.5. Pour le scénario RCP 8.5, la simulation indique également une diminution des débits pour l'horizon temporel 2040, une augmentation des débits pour l'horizon temporel 2050. Cette augmentation s'observera considérablement à la fin du siècle (2071-2100) pour ce scénario. Nous retenons qu'il existe une incertitude au niveau de l'horizon temporel 2050 puisque les deux scénarios s'opposent. D'après l'analyse des résultats, cette incertitude est due au modèle climatique HIRHAM5.

#### Conclusion générale et perspective

La méthode de mise à l'échelle SCALING a été utilisée pour améliorer la convivialité des projections des modèles climatiques régionaux pour les études sur les impacts hydrologiques du changement climatique. Cette approche de correction de biais permet de réduire les différences entre les précipitations observées et les données pluviométriques HIRHAM5. ModHYPMA est utilisé pour la simulation du débit du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Pour les périodes d'étalonnage et de validation, le Nash est supérieur à 0,70 dans le bassin versant étudié, tandis que le coefficient de détermination  $R^2$  pour les deux périodes est supérieur à 0.5. Pour la projection future basée sur les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, le débit annuel moyen projeté du fleuve en utilisant HIRHAM5 a une tendance tournée vers une diminution pour la période du début du siècle et une augmentation à fin du siècle. L'incertitude s'observe au niveau du milieu du siècle où les deux scénarios donnent des résultats opposés. Les projections des incertitudes du modèle indiquent que l'ensemble de la distribution des débits s'est déplacé vers des événements plus extrêmes (Sécheresse, Inondation) par rapport à la période de référence. Cette étude constitue la base de la gestion de l'eau et de nouvelles adaptations

au changement climatique. Les études futures devraient prendre en compte les autres facteurs influençant le débit des fleuves, en particulier les changements d'utilisation des terres, afin d'obtenir une évaluation plus complète et de guider l'élaboration de stratégies d'adaptation judicieuses. Egalement pour les études futures sur l'impact du changement climatique sur la dynamique du fleuve Ouémé à Bétérou, il faut prendre en compte les méthodes multi-modèles pour une meilleure réduction des incertitudes liés aux simulations. Nous aimerions continuer notre étude en évaluant rigoureusement les capacités d'adaptations existantes au niveau de la ville de Bétérou pour le climat actuel mais pour faute d'indisponibilité des données pouvant nous renseigner à ce propos, notre étude s'achève là. Néanmoins nous allons jeter quelques bases qui pourront mieux orienter pour les études futures. D'après les analyses des résultats des enquêtes quantitatives menés dans le cadre du PAS-PNA 2019, les localités du bassin de l'Ouémé dans sa partie supérieure c'est-à-dire à l'exutoire de Bétérou et ses environs, Ina, Pénessoulou, Kokobou, Bétérou ont une capacité moyenne à faire face à une pénurie d'eau. Même constat aux niveaux des localités dans le sud du Bassin, Ouèssè, Savalou, Bohicon, Djidja, Abomey. Cette moyenne de capacité provient des grands périphéries de ces localités dont la capacité d'adaptation est élevée mais aux niveaux des milieux ruraux, est-ce toujours le cas



# Bibliographie

- [1] Ardoin-Bardin S., 2004 : *Variabilité hydroclimatique et impacts sur mes ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 437 pages.
- [2] Arsène AKOIGNONGBE , Djafarou ABDOULAYE, Expédit W. VISSIN et Michel BOKO, *Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou (Bénin)*, Afrique SCIENCE 10(2) (2014) 228 – 242
- [3] BIGOT S., 2004. *Variabilité climatique, interaction et modifications environnementales. l'exemple de la Côte d'ivoire*, HDR, CNRS, UMR 8141, Université des sciences et technologie de Lille, 396 pages.
- [4] BOKO M., ADJOVI L.C., 1994. *Recherche des tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional. Implications agroclimatiques*. In Publications de l'Association Internationale de Climatologie. Volume 7. Thessaloniki, pp 294-304.
- [5] CASTANY G., 1982. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris, , 236 pages.
- [6] Déqué M., 2007. *Frequency of precipitation and temperature extreme over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values*. Global Planet Change, 57 :16–26.
- [7] Eliézer BIAO , *Assessing the Impacts of Climate Change on River Discharge Dynamics in Oueme River Basin (Benin, West Africa)*, 25 Octobre 2017
- [8] Eric ALAMOU,Ezéchiél OBADA, *Évaluation de la disponibilité future des ressources en eau selon des scénarios de changement climatique dans le bassin de Mékrou*, Bénin ,9 Novembre 2021.
- [9] Expédit VISSIN , *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*, Février 2010.
- [10] Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P.L., 2006. *Future change of precipitation extremes in Europe : inter-comparison of scenarios from regional climate models*. J. Geophys. Res. 111, [http://dx.doi.org/ 10.1029/ 2005JD005965](http://dx.doi.org/10.1029/2005JD005965).
- [11] Giorgi F, Shields Brodeur C., Bates G.T., 1994. *Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model*. J. Clim. 7 (3), 375–399.
- [12] Gudmundsson L., Bremnes JB., Haugen JE., Engen-Skaugen T., 2012. *Technical note : Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods*. Hydrol Earth Syst Sci, 16(9) :3383–3390, DOI 10.5194/hess-163383-2012

- [13] NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970. *River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles*. Journal of Hydrology. 10, pp. 282-29
- [14] Ministère de la Transition Ecologique France, <https://www.ecologie.gouv.fr/>
- [15] NOUNANGNONHOU, *MODELLING AND PREDICTION OF OUÉMÉ (BENIN) RIVER FLOWS BY 2040 BASED ON GR2M APPROACH*, Mars 2018, pp. 71-91
- [16] Obada, Eric Alamou, *Comparative study of seven bias correction methods applied to three Regional Climate Models in Mekrou catchment (Benin, West Africa)*, Vol.6, No.5 (Oct 2016)
- [17] PAS-PNA, *Etude de Vulnérabilité Sectorielle face aux changements climatiques au Bénin*, 2019
- [18] Adamou Worou, *Analyse de la variabilité hydro-climatique passée dans le haut Bassin de l'Ouémé*, 17 juin 2010
- [19] PERRIN C., Michel C., ANDREASSIAN V., 2003. *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*. In Journal of Hydrology 279, pp 275-289.
- [20] Plan national d'adaptation aux changements climatiques du Bénin
- [21] Sabrina TAIBI, Ayoub Zeroual, *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*, PIAHS, 16 Novembre 2021
- [22] SUTCLIFFE V.J., PIPER B.S., 1986. *Bilan hydrologique en Guinée et au Togo - Bénin*. In hydrol. Continent., vol I, n° 1, pp. 51 - 61.
- [23] Sylla, M.B.; Nikiema, P.M.; Gibba, P.; Kebe, I.; Klutse, N.A.B. *Climate Change over West Africa : Recent Trends and Future Projections*. In Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa; Springer : Basel, Switzerland, 2016
- [24] Tall, M.; Sylla, M.B.; Diallo, I.; Pal, J.S.; Faye, A.; Mbaye, M.L.; Gaye, A.T. *Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the twenty-first century*. Theor. Appl. Clim. 2016.
- [25] Tebaldi C., and Knutti R., 2007. *The use of the multi-models ensemble in probabilistic climate projections*. Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A 365, 2053–2075.
- [26] VISSIN E.W., HOUSOU C.S., BOKO M., HOUNDENOU C., 2004. *Impact des fluctuations pluviométriques sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest)* », Actes du XVIIe colloque de l'AIC, Caen (France), 17, pp. 385-388.