

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de l'Eau et Environnement



Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydrauliques

Thème :

Impact des changements climatiques sur les ressources en eau

Cas d'un bassin de l'Oued El Harrach Amont

Présenté par

KHETTAB, Nawel

Devant le jury composé de:

Mr REMINI, B	Professeur, U. de Blida	Président
Mr MERABTI, A	Maître de conférences B, U. de Blida	Examineur
Mme TAIBI-FEDDAL, S	Maître de conférences A, U. de Blida	Promotrice
Mr ZEROUAL, A	Maître de conférences A, ENSH	Co-promoteur

Année universitaire 2020 / 2021

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير تغير المناخ على توفر الموارد المائية في المستجمع العلي لمياه وادي الحراش الذي هو جزء من الحوض الساحلي الجزائري الكبير. استخدمنا مخرجات النماذج المناخية الإقليمية لمشروع Cordex-Africa للقرن الحادي والعشرين. تمت معايرة النموذج الهيدروليكي GR2M والتحقق من صحته بمعيار Nash بمقدار يفوق 70%. وفقاً لسيناريو هين (RCP4.5) و (RCP8.5)، درسنا تقلبات وتذبذبات التدفقات خلال فترتي إسقاط على المدى المستقبلي القريب (2045-2070) وكذا المدى المستقبلي البعيد (2070-2100) وذلك باستخدام بيانات الخاصة بهطول الأمطار ودرجة الحرارة والمستخرجة من النموذجين المناخيين الإقليميين (MPI) و (CNRM). ومن أجل تحسين عمليات المحاكاة المستقبلية، تم استخدام طرق التصحيح الاخطاء المحتملة (gamma-quatile) و (basic-quatile). وفقاً للسيناريو المتفائل (RCP4.5)، تُظهر النتائج انخفاضاً في هطول الأمطار على افق 2070 بنسبة 32.41% مع زيادة درجة الحرارة بمقدار 1 درجة. كما ان السيناريو المتشائم توقع المزيد من الانخفاضات في الموارد المياه بنحو 50% بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين.

الكلمات المفتاحية: تغيير المناخ، النماذج المناخية الإقليمية، GR2M، طرق التصحيح الاخطاء المحتملة، المستجمع العلوي لمياه وادي الحراش.

Résumé

La présente étude vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en Eau du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont qui fait partie du grand bassin du côtier algérois, en utilisant les sorties des modèles climatiques régionaux du projet Cordex- Africa au titre du 21^{ème} siècle. Pour se faire, le GR2M a été calibré et validé avec un critère de Nash supérieur à 70%. Les données simulées des pluies et des températures de deux modèles climatiques régionaux (MPI et CNRM) ont permis d'étudier la variabilité des écoulements au cours de deux périodes de projections (2045-2070 et 2075-2100) selon deux scénarios d'émission (RCP4.5 et RCP8.5). Afin d'améliorer les simulations futures, les méthodes de correction de biais « basic-quantile » et « gamma mapping » ont été utilisées. Les résultats selon le scénario optimiste à l'horizon 2070, montrent une réduction des pluies de 32,41% accompagnée d'une augmentation de température de 1°C ce qui génère une baisse des ressources en eau d'environ 50%. Le scénario pessimiste prévoit des résultats encore plus préjudiciables d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

Mots clés : changement climatique, modèle climatique régional, GR2M, correction de biais, Bassin versant de l'Oued El Harrach Amont.

Abstract

This study aims to assess the impact of climate change on the availability of water resources in the watershed of the Oued El Harrach Amont, which is part of the large Algerian coastal basin. We used the outputs of the regional climate models of the Cordex-Africa project for the 21st century. The GR2M has been calibrated and validated with a Nash criterion greater than 70%. According to two emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), we studied the variability of flows during two projection periods (2045-2070 and 2075-2100) using rainfall and temperature data from two regional climate models (MPI and CNRM). In order to improve future simulations, the "basic-quantile" and "gamma mapping" bias correction methods were used. According to the optimistic scenario (RCP45), results show for 2070 a reduction in rainfall of 32.41% with a temperature increase of 1°C. These changes generate a decrease in water resources of about 50%. The pessimistic scenario predicts even more damaging results by the end of the 21st century.

Keywords: Climate change, regional climate model, GR2M, bias correction, watershed of the Oued El Harrach Amont.

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a donné la force et le courage d'aller au bout de ce mémoire de fin d'étude.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à Mme Taibi-Feddal Sabrina, docteur à l'université de Blida 1, pour m'avoir encadré, je lui exprime ma reconnaissance pour sa disponibilité et pour ses précieux conseils qui m'ont guidé dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également, mon co-promoteur Mr Zeroual Ayoub, Docteur à l'ENSH, pour son soutien, sa patience et surtout son accompagnement durant tout ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes plus vifs et sincères remerciements à Mr Allouche Abdelkrim, Directeur des Ressource en Eau de la Wilaya de Blida, pour son professionnalisme et son humanisme de m'accorder l'autorisation de concilier la préparation du présent diplôme avec mon activité professionnelle durant l'année 2020-2021. Cette confiance m'a grandement motivée pour ajouter plus de passion et d'entrain dans mon travail.

De même, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes ami(e)s et mes collègues, responsables au niveau la DRE de Blida : Mr Oussaid Youcef, Mlle Harnafi Houria, Mr Chaouati Mohamed et Meddi M'hamed et qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Je tiens à remercier Mr Imessaoudene Said, chef de service de l'ANRH de Blida, pour avoir mis à ma disponibilité toutes les données nécessaires utilisées dans cette étude.

Je me permets d'exprimer tout mon respect aux membres de jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail

Aussi, je tiens à remercier mes proches pour leur soutien incommensurable.

Enfin un vif remerciement pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.

Dédicace

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à toute ma famille :

A mes chers parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je ne vous remercierais jamais assez pour votre présence et votre dévouement.

A mes sœurs, mes frères, mon beau-frère, mes belles sœurs, mon neveu et mes nièces.

De même, je remercie ma meilleure amie, ma sœur et surtout ma confidente qui m'a soutenu et encouragé.

Je remercie également tous mes ami(e)s, mes collègues du Bureau de suivi des projets de l'assainissement de la DRE de Blida et mes camarade(s) du master 2 sans exception.

Enfin, je me permets d'exprimer mes sincères remerciements à toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie.

Nawel

Table des matières

Introduction générale	1
1. ETAT DE L'ART SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	3
Introduction	3
1.1. Changements climatiques à l'échelle planétaire	3
2. Changements climatiques passés et futurs à l'échelle de la région méditerranéenne ..	5
2.1. Variabilité climatique observée en Algérie	7
Conclusion	8
2. MODELISATION HYDROLOGIQUE	10
Introduction	10
2.2. Définition d'un modèle hydrologique	10
2.3. Objectifs et applications de la modélisation hydrologique	11
2.4. Module de la modélisation pluie-débit	12
2.5. Classification de modèles hydrologiques:	13
2.6. Fonctionnement du modèle : Calage, validation, exploitation	14
2.7. Critères d'évaluation du modèle pluie-débit	14
2.8. Description des Modèles Génie Rural « GR2M »	17
2.8.1. Structure et description mathématique du GR2M	17
2.8.2. Paramètres de GR2M	19
2.9. Application des modèles pluie-débits sur les bassins versants de l'Algérie	20
Conclusion	21
3. MODELISATION CLIMATIQUE	22
Introduction	22
3.1. Les modèles climatiques	22
3.2. Scénarios climatiques ou scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES)	22
3.3. Description du modèle climatique	24
3.4. Type de modèles climatiques	25
3.5. Modèles climatiques régionaux du projet CORDEX	26
3.6. Modèles climatiques régionaux du projet CORDEX- Africa	27

3.7. Application du modèle Cordex-Africa en l'Algérie	28
Conclusion	29
4. CONTRIBUTION DU MODELE GR2M ET DES MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX A LA PREVISION DES ECOULEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED EL HARRACH AMONT	30
4.1. Présentation du bassin versant de l'Oued El Harrach amont	30
4.1.1. Situation géographique	30
4.1.2. Caractéristiques géomorphologiques	30
4.1.3. Relief du bassin	31
4.1.4. Caractéristiques géologiques du bassin	33
4.1.5. Ressource en eau	33
4.2. Base de données hydro-climatiques	34
4.2.1. Provenance des données	34
4.2.2. Climatologie	35
4.3. Calage et validation du modèle GR2M sur le bassin versant	37
4.4. Evaluation des performances des Modèles Climatiques Régionaux « MCR » :	39
4.4.1. Simulation des précipitations passées par les Modèles Climatiques Régionaux « MCR »	39
4.4.2. Simulation des températures passées par les Modèles Climatiques Régionaux « MCR »	40
4.4.3. Projection climatique à l'horizon 2070 et 2100	42
4.5. Correction de biais des sorties des modèles	49
4.5.1. Correction des biais appliquée aux précipitations	49
4.5.2. Correction des biais pour les températures	53
4.5.3. Correction des biais pour les ETP	54
4.5.4. Correction des biais pour les écoulements	56
4.6. Comparaison des résultats	59
Conclusion :	62
Conclusion générale	64

Liste des abréviations

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

B-Q : Basic-Quantile.

Cemagref : Centre d'Etude du Machisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

CORDEX : Projet expérimental de simulation climatique à l'échelle régionale – COordinated

DREWB : Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Blida.

Regional climate Downscaling EXperiment.

ETP : Evapo-Transpiration Potentielle.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

G-M : Gamma-Mapping.

GR : Génie Rural.

GR2M : Génie Rural à pas de temps Mensuels.

MCGA : Modèles de Circulation Générale Atmosphérique

MCGAO : Modèle de Circulation Générale couplés Atmosphère-Océan

MCG : Modèle de Circulation Générale ou Modèle Climatique Global.

MCR : Modèle Climatique Régional.

OMM : Organisation Météorologique Mondiale.

ONM : Office National Météorologique.

PMRC : Programme Mondial de Recherche sur le Climat

RCP : Representative concentration Pathway : profils représentatifs d'évolution de concentration des GES.

Liste des figures

Figure 2-1 : Représentation schématique de la modélisation pluie-débit (Djelloul, 2014).....	11
Figure 2-2 : Intérêt d'un modèle pluie-débit (Perrin, 2000).....	12
Figure 2-3 : Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002)	13
Figure 2-4 : Composants d'un modèle (Singh, 1995).	13
Figure 2-5 : Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002).....	13
Figure 2-6 : Architecture du modèle GR2M (Mouelhi, 2006)	18
Figure 2-7 : Vue générale de la feuille de calcul du modèle GR2M	19
Figure 2-8 : Emplacement de la fonctionnalité « Solveur » sur le feuille Excel du modèle GR2M	20
Figure 3-1 : Les scénarios d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) (Bernardara, 2007)....	24
Figure 3-2 : Représentation des différents compartiments du système climatique et de leurs interactions (GIEC, 2007).....	25
Figure 3-3 : Vue schématique de la technique de régionalisation (Prignon, 2016).....	26
Figure 3-4 : Quatorze domaines Cordex couvrant toutes les zones terrestres et l'Arctique (WCRP, 2018)	27
Figure 3-5 : Domaine d'application du Cordex –Africa.....	28
Figure 4-1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont.....	30
Figure 4-2 : Courbes hypsométriques du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)	32
Figure 4-3 : Carte de la topographie du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)	32
Figure 4-4 : Carte de la pente du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)	32
Figure 4-5 : Géologie du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)	33
Figure 4-6 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued El Harrach amont (ANRH)	34
Figure 4-7 : Point de confluence des deux oueds (Auteur)	34
Figure 4-8 : Variabilité interannuelle des températures de la station de Dar El Beida de 1972 à 2016	35
Figure 4-9 : Variabilité interannuelle des précipitations de la station « La passerelle » de 1977 à 2019	36
Figure 4-10 : Variabilité interannuelle des ETP pour le bassin versant de 1972 à 2016.....	37
Figure 4-11 : Résultat de la modélisation pour les périodes de calage Sept 1981 – Août 1991 de la station pluviométrique « La passerelle »	38

Figure 4-12 : Résultat de la modélisation pour les périodes de validation Sept 2003 – Fév 2013 de la station pluviométrique « La passerelle »	38
Figure 4-13 : Représentation du cycle saisonnier des précipitations.....	39
Figure 4-14 : Représentation du cycle saisonnier des températures.....	41
Figure 4-15 : Simulations des précipitations futures à l'échelle saisonnière par le modèle MPI	42
Figure 4-16 : Simulations des précipitations futures à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM	43
Figure 4-17 : Simulations des températures futures à l'échelle annuelle par le modèle MPI ..	43
Figure 4-18 : Simulations des températures futures à l'échelle saisonnière par le modèle MPI	44
Figure 4-19 : Simulations des températures futures à l'échelle annuelle par le modèle CNRM	44
Figure 4-20 : Simulations des températures futures à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM	45
Figure 4-21 : Simulations des ETP futures à l'échelle saisonnière par le modèle MPI	45
Figure 4-22 : Simulations des ETP futures à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM.....	46
Figure 4-23 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle annuelle par le modèle MPI.....	47
Figure 4-24 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle saisonnière par le modèle MPI	47
Figure 4-25 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle annuelle par le modèle CNRM	48
Figure 4-26 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM	48
Figure 4-27 : Cas de correction du biais du modèle MPI pour RCP4.5	50
Figure 4-28 : Comparaison des simulations futures du modèle CNRM RCP4.5 après la correction par rapport aux observations	51
Figure 4-29 : Comparaison des simulations futures du modèle CNRM RCP8.5 après la correction par rapport aux observations	51
Figure 4-30 : Comparaison des simulations futures du modèle MPI RCP4.5 après la correction par rapport aux observations.....	52
Figure 4-31 : Comparaison des simulations futures du modèle MPI RCP8.5 après la correction par rapport aux observations.....	52
Figure 4-32 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle annuelle par le modèle MPI	53

Figure 4-33 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle annuelle par le modèle CNRM.....	53
Figure 4-34 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle MPI	54
Figure 4-35 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM.....	54
Figure 4-36 : Simulations des ETP futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle MPI.....	55
Figure 4-37 : Simulations des ETP futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM	55
Figure 4-38 : Simulations des écoulements futurs après correction à l'échelle annuelle par le modèle MPI	56
Figure 4-39 : Simulations des écoulements futurs après correction à l'échelle annuelle par le modèle CNRM.....	57
Figure 4-40 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI –RCP4.5	57
Figure 4-41 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI –RCP8.5	58
Figure 4-42 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM –RCP4.5	58
Figure 4-43 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM –RCP8.5	59
Figure 4-44 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle annuelle par le modèle MPI	59
Figure 4-45 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle annuelle par le modèle CNRM.....	60
Figure 4-46 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI à l'horizon 2045-2070	60
Figure 4-47 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI à l'horizon 2075-2100	61
Figure 4-48 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM à l'horizon 2045-2070	61
Figure 4-49 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM à l'horizon 2075-2100	62

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versant (Perrin et Michel, 2003)	19
Tableau 4-1 : Caractéristiques hydro-morphologiques du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)	31
Tableau 4-2 : Présentation des stations pluviométrique et hydrométrique du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont.....	35
Tableau 4-3 : Résultat de la modélisation pour les périodes de calage et de validation de la station pluviométrique « La passerelle »	37
Tableau 4-4 : Le biais estimé à l'échelle mensuelle entre les pluies observées et simulées entre la période 1981-2005	40
Tableau 4-5 : Le biais estimé entre les pluies observées et simulées saisonniers entre la période 1981-2005	40
Tableau 4-6 : Le biais estimé à l'échelle mensuelle entre les températures observées et simulées entre la période 1981-2005	41
Tableau 4-7 : Le biais estimé entre les températures observées et simulées saisonnières entre la période 1981-2005	41

Introduction générale

La problématique des changements climatiques est considérée comme l'un des défis majeurs du développement à l'échelle internationale et régionale ainsi qu'au niveau local, compte tenu de ses effets nocifs sur la santé de l'homme et sur l'environnement et notamment sur les ressources en eau. Aussi, la pénurie de l'eau dans le monde, et la gestion des ressources en eau constituent l'un des problèmes les plus cruciaux du 21^{ème} siècle (Saidi, 2007). C'est pourquoi, la communauté scientifique accorde de plus en plus d'importance à l'évolution du climat dans des scénarios de changements climatiques.

En effet, le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de l'année 2013, considère, en particulier, la région Méditerranéenne comme « très vulnérable aux changements climatiques ». D'ailleurs, au cours de ces trente dernières années, l'Algérie a particulièrement souffert de plusieurs périodes de sécheresse intense et persistante caractérisée par une tendance générale vers l'assèchement dans le nord du pays (Zeroual et al., 2017), avec un déficit pluviométrique de 13% à 30% (Taibi et al., 2013).

Pour la majorité des études d'impacts du changement climatique, une correction de biais est généralement effectuée sur les sorties des modèles climatiques afin d'améliorer les simulations futurs de ces modèles.

A ce titre, l'objectif de notre présente étude est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau au niveau du bassin de l'Oued El Harrach amont en utilisant les sorties des modèles climatiques régionaux du projet Cordex- Africa pour deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5. Pour améliorer les simulations des modèles, les méthodes de correction de biais « basic-quantile » et « gamma-quantile » sont utilisées. Les résultats obtenus peuvent être utilisés dans l'élaboration des plans directeurs de développement des ressources en eau par la mise en place de stratégies d'atténuation et d'adaptation à moyen et long terme.

Le présent mémoire sera articulé selon quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à la description de l'état de l'art sur les changements climatiques selon trois axes principaux à savoir : les changements climatiques à l'échelle internationale et régionale ainsi qu'au niveau local.

Quant au second chapitre, il traite de la modélisation hydrologique par la présentation d'une synthèse bibliographique générale sur les modèles hydrologiques et plus particulière sur le modèle conceptuel (Modèle Génie rural GR2M).

S'agissant du troisième chapitre, il présente une description détaillée sur la modélisation du changement climatique et ses impacts sur les ressources en eau.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre englobe l'étude détaillée et les résultats de la modélisation hydrologique et l'impact de la variabilité climatique sur les écoulements du Bassin de l'Oued el Harrach Amont.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1. ETAT DE L'ART SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Introduction

La problématique des changements climatiques a été considérée comme l'un des défis majeurs du développement à l'échelle internationale et régionale ainsi qu'au niveau local. En effet, les problèmes liés aux changements climatiques occupent une place prépondérante parmi les préoccupations essentielles des nations.

Il est important de souligner que le changement climatique est une modification durable du climat terrestre, dû à divers paramètres intrinsèques de la terre et à des influences extérieures telles que les activités humaines.

La présente partie sera consacrée aux changements climatiques observés à l'échelle planétaire et méditerranéenne ainsi qu'au niveau de l'Algérie.

1.1. Changements climatiques à l'échelle planétaire

Durant ces dernières années, le climat a connu des fluctuations à l'échelle mondiale dont les effets se sont accentués. Ces variations semblent préoccuper plusieurs chercheurs en particulier ceux du groupe d'experts intergouvernemental.

En 1988, les Nations Unies ont mis sur pied un Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans le but consiste à évaluer périodiquement les travaux scientifiques consacrés aux changements climatiques et permettre alors aux décideurs de prendre conscience de l'évolution du climat, des incidences, des risques et des possibilités d'adaptation et d'atténuation.

Ainsi, ce groupe a publié des rapports méthodologiques, spéciaux, supports techniques et cinq rapports d'évaluation successivement pour les années (1990, 1995, 2001, 2007 et 2013).

Dès leur premier rapport d'évaluation, les scientifiques ont établi des prévisions affinées qui prédisent avec certitude un réchauffement climatique continu d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

Les rapports suivants ont confirmé les observations antérieures en apportant toutefois des enseignements récents complémentaires.

Quant au cinquième rapport de l'année 2013, il conclut notamment, sur la base des faits observés l'influence et les actions de l'homme sur le système climatique.

Il révèle également les conséquences notables sur le climat :

- La température moyenne a augmenté de 1,2°C durant les 30 dernières années (1983 à 2012) constituant la période la plus chaude de l'hémisphère nord (températures moyennes de l'hémisphère) depuis au moins 1400 ans. En effet, la hausse de la température par période s'est accentuée telle que illustrée ci-après :

- ✓ De 1,1 °C depuis l'époque préindustrielle(1850-1900),
- ✓ De 0,85°C durant la période 1880-2012.
- ✓ De 1,1 °C durant la seule année 2019 par rapport à l'époque préindustrielle(1850-1900) (OMM, 2020).
- ✓ De 1,2 °C à celle de la période de référence 1850-1900.
- La décennie 2001–2010 et l'année 2010, à égalité avec 2005 et 1998, sont considérées comme les plus chaudes à l'échelle mondiale depuis que l'on dispose de relevées météorologiques (OMM, 2013).
- La décennie 2010–2019 est la plus chaude jamais observée avec des hausses nettement plus élevées de 2015 à 2019. Les augmentations, sans précédent, pour l'année 2019 ont touché particulièrement l'Australie, l'Inde, le Japon et l'Europe. (OMM, 2020).

Outre les effets mentionnés ci-dessus, le 5^{ème} rapport met en exergue les impacts relatifs aussi bien à l'atmosphère qu'aux précipitations et aux océans :

- L'atmosphère et les océans ont stocké plus de 90% de la chaleur accumulée par la terre depuis 40 ans (1971 à 2010).
- Les précipitations ont connu des évolutions variables à savoir :
 - ✓ Pour la période 1901 à 1951, la variation de la moyenne mondiale des précipitations sur les régions continentales a été faible, ensuite moyenne après cette date.
 - ✓ De juillet 2018 à juin 2019, la moyenne des précipitations sur 12 mois a fortement augmenté dans la partie continentale des États-Unis (962 mm). Quant à l'Afrique australe, l'Amérique centrale et certaines parties de l'Amérique du Sud, les quantités de précipitations ont été anormalement faibles. (OMM, 2020).
- La vitesse moyenne d'élévation du niveau de la mer a été de 5,0 mm/an durant la période quinquennale mai 2014–mai 2019, contre 4,0 mm/an sur la période décennale 2007–2016 soit une élévation considérablement plus rapide que les 3,2 mm/an de moyenne enregistrés depuis 1993 (OMM, 2019).
- L'élévation du niveau moyen des océans et des mers suite au réchauffement des eaux et à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires s'élève à $3,3 \pm 0,3$ mm/an. Il a atteint 20 cm depuis 1880 à 2010. Le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale en 2020 a été similaire à celui de 2019 (OMM, 2020).
- L'océan a absorbé entre 20 et 30 % des émissions de dioxyde de carbone d'origine anthropique au cours des 40 dernières années, ce qui a provoqué son acidification(OMM, 2020).

- La concentration des gaz à l'effet de serre a augmenté de 40% depuis le début de l'ère industrielle. Effectivement, les émissions mondiales de CO₂ dues aux combustibles fossiles ont augmenté de 0,6 % en 2019 (dans une fourchette allant de -0,2 % à +1,5 %) (OMM, 2020).
- Des changements concernant de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont été observés depuis l'année 1950. A titre d'exemple, l'OMM précise qu'en 2020, trente (30) tempêtes tropicales ont touché directement de nombreux pays du bassin de l'Atlantique, de la mer des Caraïbes, du golfe du Mexique, la terre au Nicaragua et le territoire continental des États-Unis d'Amérique. Aussi, des inondations majeures ont eu lieu dans le nord de l'Argentine, en Uruguay et dans le sud du Brésil. La sécheresse s'est abattue sur de nombreuses régions du sud-est asiatique et sur l'Australie, qui a connu son année la plus sèche jamais enregistrée.

Les projections climatiques que prédisent le GIEC et l'OMM d'ici la fin 21^{ème} siècle montrent :

- L'élévation des températures moyennes mondiales de 1,4 à 5,8° C d'ici 2100 (GIEC, 2013) ; il y a au moins une chance sur cinq qu'elle dépasse temporairement 1,5°C d'ici 2024 (OMM, 2020).
- Les précipitations seront de 0.5% à 1.0% par décennie dans l'hémisphère Nord, comparativement à 0.2% à 0.3% dans les pays en région tropicale (GIEC, 2013).
- Le réchauffement climatique provoquera des événements extrêmes plus intenses tels que les sécheresses et les inondations.
- L'océan aura absorbé d'ici 2100, deux à quatre fois plus de chaleur qu'au cours des 50 dernières années si le réchauffement de la planète est limité à 2 °C, et jusqu'à quatre à sept fois plus si les émissions sont supérieures (GIEC-SROCC, 2019).
- L'augmentation moyenne des niveaux des océans d'environ 30 cm à 60 cm d'ici à 2100 et de 60 à 110 cm si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent sans discontinuer. La fréquence accrue des ondes de tempête à l'échelle locale (GIEC-SROCC, 2019).
- La concentration en CO₂ aura doublé en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

2. Changements climatiques passés et futurs à l'échelle de la région méditerranéenne

Le changement climatique est probablement l'un des défis les plus pressants auxquels doit faire face la région méditerranéenne. Le bassin méditerranéen a été identifié comme l'une des régions les plus sensibles au changement climatique au niveau mondial. Le cinquième rapport

d'évaluation du GIEC de l'année 2013 considère la région comme « très vulnérable aux changements climatiques ».

En effet, la diminution des précipitations moyennes et l'augmentation importante des températures en particulier en Eté conduiront à une diminution des ressources en eau et à une augmentation de la sévérité des sécheresses et des canicules. L'impact de ces changements est très prononcé, particulièrement sur ses rives Sud et Est (MedECC,2019).

Des études récentes ont nettement mis en évidence les impacts du changement climatique sur la variabilité hydrologique du bassin méditerranéen (Hertig et Trambly, 2016 ; Paeth et al, 2016).

Dans son rapport d'évaluation de l'année 2019, le réseau indépendant d'experts méditerranéens sur le changement climatique et environnemental (MedECC) fondé en 2015 et dont l'objectif est de rassembler, mettre à jour et consolider les meilleures connaissances scientifiques et de les rendre accessibles aux décideurs et à la communauté scientifique a mis en évidence les faits suivants :

- L'augmentation de la température dans le bassin méditerranéen a atteint 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels (1850-1900). Elle atteindra 2,2°C à l'horizon 2050 et de 3,8°C à l'horizon 2100. Il apparaît que les points chauds côtiers sont principalement situés au Sud-Est de la région méditerranéenne.
- Le niveau des précipitations a diminué sur une très grande partie du bassin méditerranéen en particulier au Maghreb, en Espagne et sur la rive Nord-Est, avec des baisses pouvant localement atteindre 20 à 25mm/an par décennie. A l'horizon 2100, les projections des précipitations révèlent une réduction de 15% pour la saison des pluies (septembre à mai) et de 30% en été. Cela affectera les régions méridionales de la Méditerranée. Elles pourraient diminuer de 35 % sur la rive sud et de 25 % sur la rive nord d'ici la fin du siècle. Une augmentation des épisodes de pluies torrentielles est aussi à prévoir avec des risques d'inondation côtière (+50 % d'ici à 2100) ainsi que des risques d'érosion sur l'ensemble du littoral (+13 %).
- L'élévation du niveau de la mer qui a augmenté de 6cm au cours des 20 dernières années à 17 cm sur le dernier siècle. Une tendance qui devrait s'accélérer avec des valeurs globales de 43 à 84 cm d'ici 2100.
- L'acidité des eaux au nord-ouest de la Méditerranée a augmenté de 10 % depuis 1995 et si le niveau d'émissions CO2 reste constant, cette acidité devrait augmenter encore de 30 % d'ici 2050 et de 150 % d'ici 2100.

Dans un contexte de changement climatique, l'analyse de la variabilité des précipitations et des températures a fait l'objet de plusieurs études qui se sont intéressées singulièrement à l'Afrique du Nord comme celles de (Bargaoui et al, 2014), (Filahi et al, 2017) et (Taibi et al, 2019).

Depuis les années 2003 à 2013, il est constaté une reprise des pluies dans tous les pays du Maghreb, mais avec un caractère plus intense et une saison pluviométrique plus courte (El Watan.com, 2020).

S'agissant de l'année 2014 jusqu'à 2017, les pluies ont été moins généreuses dans les trois pays du Maghreb accusant parfois des déficits importants comme ce fut le cas en Tunisie. En 2018 et 2019, les cumuls pluviométriques ont été importants surtout sur la partie est du pays. On alterne ainsi entre des cycles courts humides et secs (El Watan.com, 2020).

Selon les experts du GIEC, une hausse des températures de 2 à 3°C est attendue dans la région du Maghreb dans les prochaines années (projection pour l'année 2050). D'ici la fin du siècle, la hausse pourrait atteindre 3 à 5°C. Pour les précipitations, les modèles de prévision sur un demi-siècle donnent des résultats qui font état d'une baisse d'un quart du cumul pluviométrique annuel. Dans les années à venir, il fera plus chaud et plus sec en Algérie.

2.1. Variabilité climatique observée en Algérie

La situation géographique de l'Algérie, lui confère une diversité climatique et écologique particulière. En effet, en l'Algérie, la variabilité de la disponibilité des ressources en eau n'est pas récente. Mais ces dernières années, la sécheresse s'est manifestée d'une manière préoccupante, sévère, persistante et avec une intensité remarquable. Cependant, le nord-ouest de l'Algérie est une zone particulièrement vulnérable au changement climatique (Achour et al, 2020; Bouabdelli et al, 2020; Meddi et al, 2010; Zeroual et al, 2017).

Des études de l'évolution historique des facteurs du climat mettent en évidence ;

- Une augmentation de la pluviométrie moyenne annuelle selon deux principales directions à savoir de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le Nord (Hassini et al, 2009)
- Une baisse de la pluviométrie sur l'ensemble du pays marqué par une sécheresse intense et persistante durant les années 40 et 70 (Matari et Douguedroit, 1995)
- Une diminution des précipitations au nord-ouest de l'Algérie au cours de la période 1936-2016 marquée par un déficit pluviométrique de 18 à 29% à partir des années 70 et 80. Un déficit pluviométrique plus important est observé au cours de la période 1961-2016. Ceci montre que les années 60 et début 70 ont été les plus excédentaires (Taibi et al, 2017).
- Une baisse significative des précipitations depuis les années 1970 dans le Nord-Ouest

de l'Algérie. Cette diminution intervient pendant les mois de décembre et janvier (en hiver), et mars et avril (au printemps), et est associée à une réduction de 10-20mm et 20-50mm des précipitations quotidiennes, respectivement, tandis que les précipitations augmentent dans la région orientale (Taibi et al, 2019).

- Une hausse de température moyenne sur l'ensemble du pays, ainsi une hausse nette des températures minimales et maximales sur l'ensemble du Nord de l'Algérie depuis la décennie 70 et prolongeant jusqu'à nos jours : durant ces 20 dernières années (Benyettou et Bouklikha, 2017).
- Une augmentation des températures maximales annuelles de 1,2 °C et saisonnières de 1,6 °C pour la période allant de 1950 à 2005 sur l'ensemble du pays (Boucherf, 2010).
- Une occurrence plus grande de phénomènes extrêmes comme les inondations et les sécheresses. A titre d'exemple, durant 2020, plusieurs régions d'Algérie ont connu des pluies torrentielles citant les wilayas d'Adrar, Mila, Béchar, Oran, Alger, Boumerdès, Médéa, M'Sila, Aïn Defla et Tiaret (Météo Algérie, 2020).

En termes de précipitations, une diminution significative devrait selon les projections des régions algériennes, être enregistrée en hiver et au printemps au cours des périodes 2021-2050 et 2070-2099 (ADB et al, 2018).

Aussi, la température de l'air devrait augmenter d'environ 2°C à 3°C dans les régions algériennes d'ici les années 2050. D'ici 2100, la fourchette de températures projetée est plus importante dans les régions côtières avec des augmentations projetées entre 4°C et 6°C (ADB et al, 2018)

Conclusion

Le changement climatique évoqué a eu des conséquences notables au cours de ces dernières années. Nous pouvons citer en particulier :

- Une augmentation des températures moyennes de la troposphère et des océans, avec des conséquences sur la fréquence et l'intensité de nombreux phénomènes météorologiques avec impacts aigus à la fois sur le cycle annuel de l'eau et sur les phénomènes extrêmes comme les risques alternatifs d'inondation répétitives et de la sécheresse.
- L'augmentation des populations, l'urbanisation et la dépendance croissante aux infrastructures de transport, de communication et de distribution d'énergie accentuent la vulnérabilité à ces phénomènes climatiques.

En particulier la région de l'Europe et du bassin Méditerranéen est sans aucun doute très sensible aux variations et changements du climat (Goubanova, 2007).

CHAPITRE II

MODELISATION HYDROLOGIQUE

2. MODELISATION HYDROLOGIQUE

Introduction

Ce chapitre a pour but de situer le contexte de la modélisation hydrologique comportant entre autres la transformation pluie-débit, ses objectifs ainsi que ses différentes classes.

Il traite également de la définition du modèle GR2M choisi et quelques exemples de son utilisation en Algérie.

Il convient de souligner que la connaissance des débits des oueds, est d'une importance cruciale pour la gestion des ressources en eau et principalement la maîtrise du risque hydrologique par la prévision des crues et des conséquences des inondations.

Dans cette optique, la modélisation en hydrologie est devenue au cours des dernières décennies un outil privilégié pour de nombreuses activités de recherche et applications opérationnelles.

En hydrologie, plusieurs modèles ont été développés au titre de la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Ces modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée tout en calculant un hydro-gramme en sortie du bassin versant. Ils utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique.

2.2. Définition d'un modèle hydrologique

Un modèle hydrologique est défini comme étant la représentation simplifiée de tout ou d'une partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques, exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelles et spatiales à celles que l'on observe dans la nature. (Mathevet, 2005)

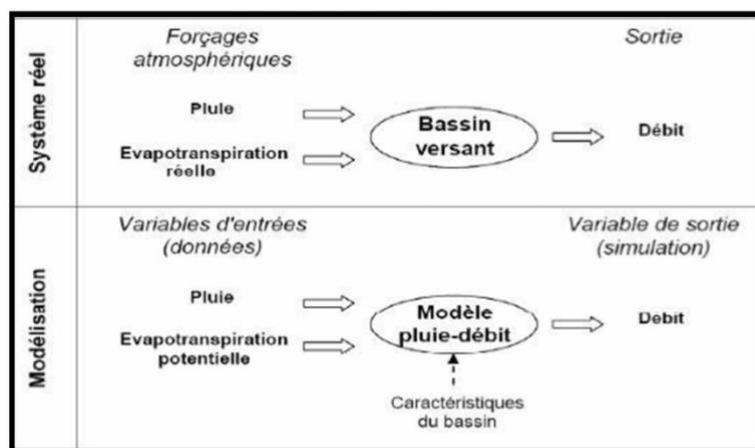


Figure 2-1 : Représentation schématique de la modélisation pluie-débit (Djelloul, 2014)**2.3. Objectifs et applications de la modélisation hydrologique**

La modélisation de la transformation pluie-débit intègre dans son contexte les différents éléments du cycle hydrologique. Certains types de modèles nécessitent le passage par la modélisation de chaque élément avant de construire le modèle finale pluie-débit. La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque.

Selon (Le Clerc, 2004), il est distingué trois types d'utilisation de la modélisation en hydrologie :

- La modélisation comme outil de recherche : Suite à l'interprétation des données mesurées, différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être avancés et confrontés aux mesures.
- La modalisation comme outil de prévision : anticipation des évolutions futures du débit dans un système hydrologique. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas, ils font appel à la connaissance de processus hydrologiques.
- La modélisation comme outil de reconstitution des séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple la délimitation des zones inondables dans les plans de préventions du risque d'inondation, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié.
- Le calcul de débits à partir d'observations (ou de production) de pluies est utilisée dans les domaines suivants :
- Gestion des stocks : Dans le cas de tous les problèmes liés aux étiages et aux réservoirs d'eau, il est facile de comprendre que la modélisation pluie-débit est un outil précieux pour prévoir ce qu'il arrivera en cas de sécheresse.
- Prévision en période de crue : l'observation des pluies pendant un épisode critique peut permettre de prévoir la crue avec un délai correspondant aux temps de concentration.
- Gestion des barrages : On dispose généralement de séries de mesures de pluviométrie

plus longues que les séries de mesures de débits. Ces longues séries permettent de prévoir les valeurs extrêmes et d'optimiser la gestion des grands ouvrages.

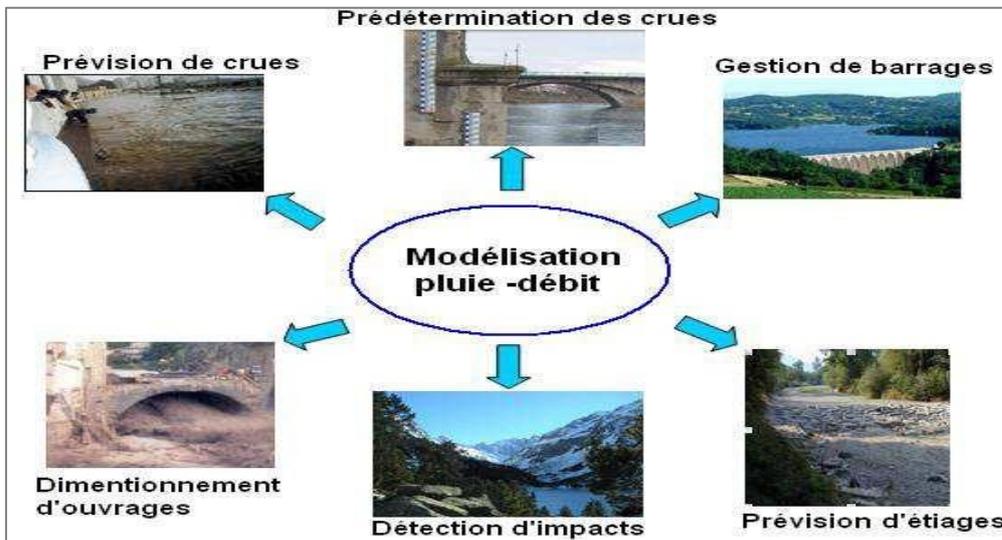


Figure 2-2 : Intérêt d'un modèle pluie-débit (Perrin, 2000).

2.4. Module de la modélisation pluie-débit

Un modèle hydrologique est généralement défini comme illustré dans la figure 2-3 par :

- **Variables d'entrées** (ou entrées du modèle): Le modèle fait appel à ces variables qui dépend du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamique du milieu).
- **Variables de sortie** (ou sorties du modèle): le modèle répond par un ensemble de variable (débits, flux ou concentration en polluant, ...).
- **Variables d'état** (ou variables internes au système) : elles évoluent en fonction du temps et permettent de caractériser l'état du système modélisé (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols, ...).
- **Les paramètres**: qui interviennent dans les équations du modèle, et qui représentent la part non explicite du fonctionnement du bassin dans ces équations. Ils peuvent avoir une signification physique ou non. Ils servent à adapter les relations régissant le modèle au fonctionnement réellement observé. (Perrinet al. 2009).

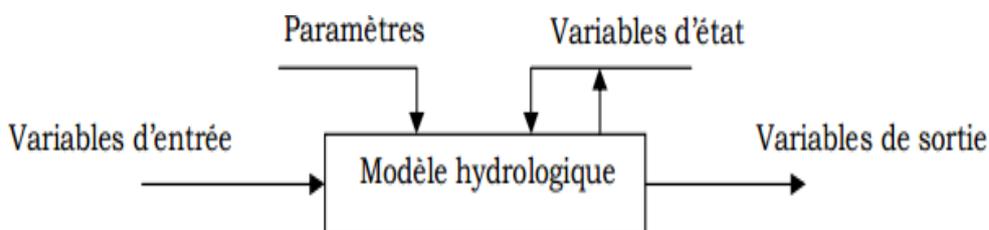


Figure 2-3 : Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002)

2.5. Classification de modèles hydrologiques:

Selon (Singh, 1995), un modèle est caractérisé par cinq éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties (Figure 2-5).

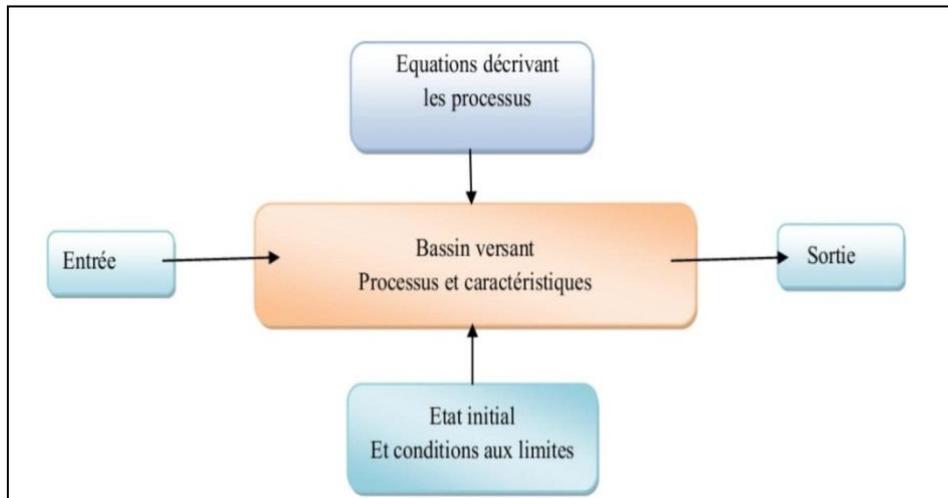


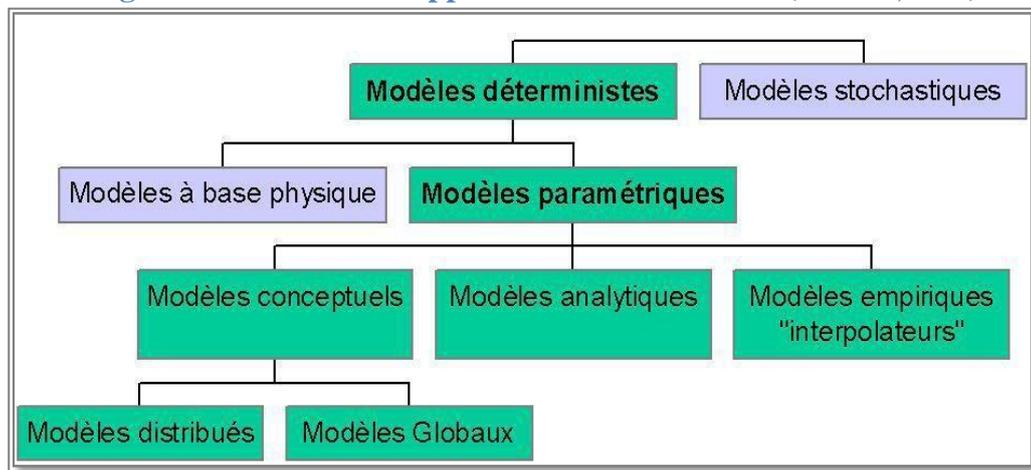
Figure 2-4 : Composants d'un modèle (Singh, 1995).

Il a aussi proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations.

Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classification : modèle global ou distribué, déterministe ou stochastique. La méthode de résolution employée peut également différencier les modèles en empirique ou conceptuel.

Gaume (2002) propose une approche de classification des modèles représentée selon la figure suivante :

Figure 2-5 : Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002).



2.6. Fonctionnement du modèle : Calage, validation, exploitation

L'application du modèle hydrologique se déroule en plusieurs étapes: d'abord la première est consacrée aux traitements préliminaires des données permettant d'estimer les paramètres du modèle (calage) en suite vient l'étape de validation et enfin l'étape d'exploitation.

- Caler le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon :
 - ✓ la méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations),
 - ✓ la méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupes d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.
- Valider ou évaluer le modèle, c'est la vérification des qualités du modèle en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celles utilisées pour le calage.
- Exploiter le modèle en définissant le domaine de validité du modèle et de ses conditions aux limites d'une part et de son champ d'application privilégié d'autre part. Cette étape couvre des domaines très variés : prévision, prédétermination (crue, lame coulée,...), reconstitution ou extrapolation.

2.7. Critères d'évaluation du modèle pluie-débit

L'évaluation ou la mesure des performances d'un modèle se fait selon les objectifs qu'on se fixe, et par conséquent, le critère qu'on choisit. Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons, l'unique contrainte étant l'objectif du jugement. Une fois le modèle choisi, il est nécessaire d'évaluer sa capacité à représenter la réalité en comparant les résultats du modèle avec les observations.

Plusieurs critères d'évaluation ont été développés, les plus utilisés en hydrologie sont:

- **Critères quadratiques** : basés sur les moindres carrés sont ceux qui sont le plus traditionnellement employés dans le domaine de l'hydrologie. L'erreur quadratique « E » s'écrit :

$$E = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2$$

Avec : $Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observé et simulé au pas de temps i , et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

- **Critère d'erreur moyenne absolue ("Mean Absolute Error")**: ce critère exprimé par

« MAE » est donné par la formule suivante :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | Q_{obs,i} - Q_{cal,i} |$$

Avec : $Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i , et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

- **Critère de la racine carrée de l'erreur moyenne ("Root Mean Square Error")**: c'est un indice important dans la modélisation conceptuelle au pas de temps mensuel. Il est exprimé par « RMSE » sous la formule suivante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}$$

Avec : $Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i , et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

- **Critères de détermination (R^2)**: il permet de juger la qualité de l'ajustement entre deux variables X et Y par la droite de régression, en expliquant la proportion de la variance de Y par les variations de X .

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec : $Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i , $\overline{Q_{obs}}$: moyenne des débits observés et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

- **Critère de Nash** : Le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Le critère de Nash « NSE » s'écrit comme suit:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec : $Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i , $\overline{Q_{obs}}$: moyenne des débits observés et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

Tel que :

Si le $NSE \leq 0$: le modèle n'est pas meilleur que la moyenne des débits observés,

Si le $NSE > 0$: le modèle est meilleur que la moyenne des débits observés

Si le $NSE = 1$: le modèle correspond parfaitement aux débits observés.

- **Coefficient de corrélation** : La corrélation entre deux ou plusieurs variables aléatoires ou statistiques numériques permet d'étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables, elle se calcule ainsi :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal,i} - \overline{Q_{cal}})(Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{cal,i} - \overline{Q_{cal}})^2}}$$

Avec :

$Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i , $\overline{Q_{obs}}$ et $\overline{Q_{cal}}$: moyenne des débits respectivement observés et simulés et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

- **Le Biais** : Le Biais est une mesure en pourcentage de la sous-estimation ou de la surestimation globale des données simulées par rapport aux données observées. Les valeurs positives indiquent une surestimation tandis que les valeurs négatives indiquent une sous-estimation par le modèle.

$$Biais = 100 * \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{cal,i} - Q_{obs,i})}{\overline{Q_{obs}}}$$

Avec :

$Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$: sont les débits respectivement observés et simulés au pas de temps i ,

$\overline{Q_{obs}}$: Moyenne des débits observés et n est le nombre total de pas de temps sur lequel on calcule le critère.

2.8. Description des Modèles Génie Rural « GR2M »

La famille des modèles GR est construite afin d'être simple et efficace. Du fait de leur architecture ne sera pas compliqué que pour reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique (Michel, 1989).

Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées.

Le modèle produit des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données initiales d'où les entrées sont la pluie et l'ETP. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau et des étiages (Perrin et al. 2007).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par (Kabouya, 1990), (Kabouya et Michel, 1991), (Makhlouf, 1994), (Makhlouf et Michel, 1994), (Mouelhi, 2003) et (Mouelhi, 2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle, l'ont adopté dans des contextes différents.

La structure du modèle, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle (Perrin et al 2007).

Elle associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (Perrin et al, 2007).

2.8.1. Structure et description mathématique du GR2M

Un schéma de la structure est présenté dans la figure, P c'est la pluie mensuelle du mois k , et E représente l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

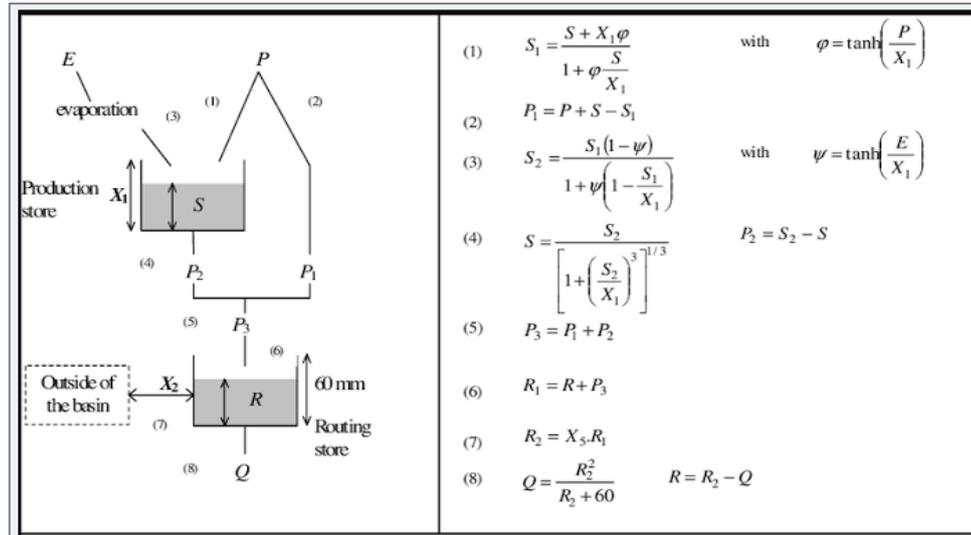


Figure 2-6 : Architecture du modèle GR2M (Mouelhi, 2006)

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \text{ où } \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et est exprimée en mm. La pluie P_1 en excès est donnée par :

$$P_1 = P + S - S_1$$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1 + \psi\left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \text{ où } \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

E : est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad \text{Et} \quad P_2 = S_2 - S$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par : $P_3 = P_1 + P_2$

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 : $R_1 = R + P_3$

Un terme d'échange en eau est alors calculé par : $F = (X_2 - 1) \cdot R_1$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_2 = X_2 \cdot R_1$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par :

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

2.8.2. Paramètres de GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuels) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains.

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs présentées dans le tableau ci-après :

Tableau 2-1 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versant(Perrin et Michel, 2003)

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1 (mm)	380	140 – 2640
X2 (-)	0,92	0,21 – 1,31

➤ Présentation du GR2M

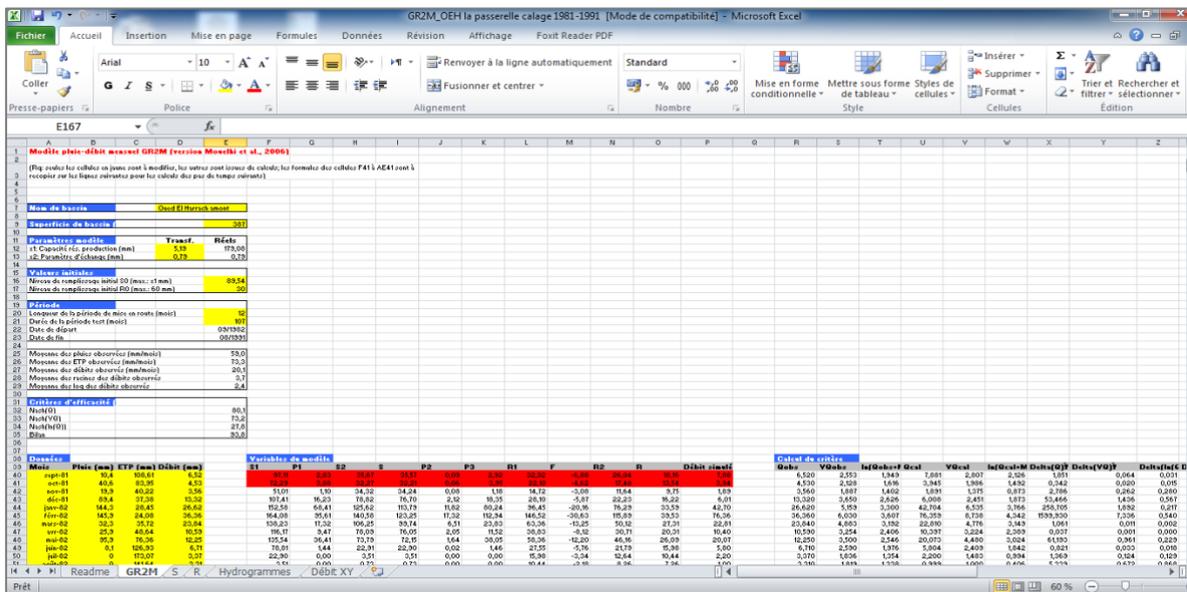


Figure 2-7 : Vue générale de la feuille de calcul du modèle GR2M

➤ Optimisation des paramètres du modèle
 LesolveurestunefonctionprésentéedansEXCEL qui permet l'optimisation des paramètres X1 et X2. C'est l'outil le plus souvent utilisé pour résoudre des équations dont le principe de fonctionnement est basé sur le calcul de l'écart entre le débit observé et le débit simulé. La valeur de la somme des carrés des écarts est réduite par le solveur pour obtenir la bonne combinaison de calage X1, X2 permettant un meilleur ajustement du modèle.

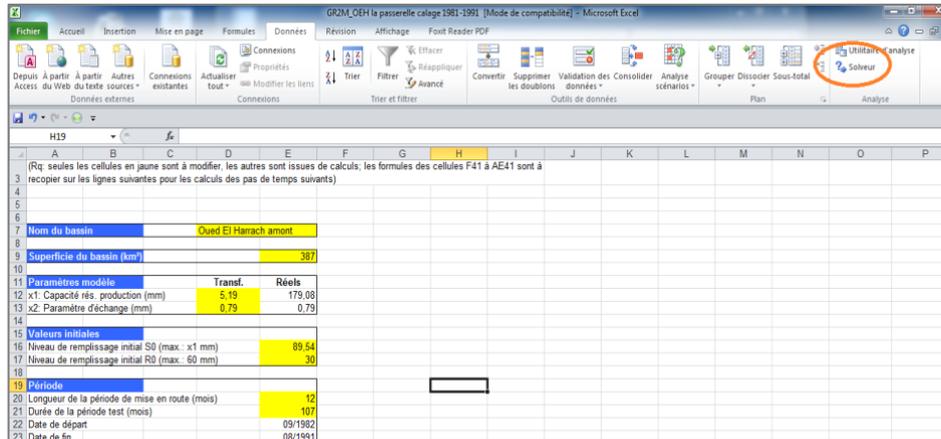


Figure 2-8 : Emplacement de la fonctionnalité « Solveur » sur la feuille Excel du modèle GR2M

Il importe de souligner qu'en Algérie, le modèle Hydrologique GR2M est le plus utilisé compte tenu de sa simplicité mais aussi de sa capacité à reproduire convenablement le fonctionnement hydrologique des bassins versants algériens.

2.9. Application des modèles pluie-débits sur les bassins versants de l'Algérie

La modélisation pluie-débit employée par le modèle GR2M a fait l'objet de nombreuses études en Algérie qui ont montré de bonnes performances.

Le modèle GR2M a été appliqué pour le bassin versant de l'oued Bechar. La valeur du critère de Nash est, de façon générale, bonne car il est supérieur à 77,9% avec un coefficient de corrélation R2 égale 0,76 (Bekhira, 2018).

Une comparaison entre les modèles GR2M, ABCD et ARIMA a été appliquée sur le bassin de Tafna (Chouly) et celui des côtières oranais (Tlata) situés Nord-Ouest de l'Algérie a montré que le modèle GR2M est le plus performant avec des critères de qualité de valeurs supérieures à 70% en calage et en validation (Boulariah et al, 2019).

Il a aussi été appliqué sur les trois grands bassins de Tafna (Chouly RN07), Macta (Hacabia) et Cheliff (Ammi Moussa, Sidi AEK Djillali, Ouled Ben AEK) situés Nord-Ouest de l'Algérie donnant des résultats satisfaisants puisque le critère de Nash est respectivement pour le bassin

de Haciabia, Chouly et Sidi Djillali au voisinage de 60% et est pour les bassins d'Ami Moussa et Ouled Ben AEK du 73.6% et 75.8% respectivement (Hadour et al, 2020).

Zennaki et al (2020) ont montré que le GR2M s'applique manière significative au bassin versant de Tafna cas de l'oued Boukiou vu que l'optimisation des paramètres de calage a été obtenue pour des valeurs élevées des critères de qualité : critère de Nash supérieur à 80% et coefficient de corrélation de plus de 90%

Des résultats satisfaisants, ont été également observés sur le bassin versant de Mitidja Ouest avec un critère de Nash des valeurs supérieures à 60% (Hallouz et al, 2019).

Ce modèle a été appliqué sur le bassin de Ain Dalia (Région de Souk Ahras) et a permis de déterminer de manière satisfaisante les paramètres caractéristiques de ce bassin puisque le coefficient de Nash est de 71,7% en calage et de 78,5% en validation avec un coefficient de détermination est supérieur à 71% (Taibi et al, 2020).

Conclusion

Les progrès informatiques ont permis un développement important de modèles hydrologiques variés, des simples aux complexes, qui dépendent des besoins de l'utilisateur et des questions auxquelles ils cherchent à répondre (prédiction de crues, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...).

Ainsi, l'utilisation des modèles nécessite de disposer de séries sur la même période d'observation de données relatives de précipitations, d'évaporation et de débits à l'exutoire. La disponibilité de ces trois séries de données constitue un outil capital et primordial.

S'agissant de notre présente étude, notre choix se porte sur le modèle GR2M qui prend en compte les paramètres les plus pertinents qui traite la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, de type conceptuel global qui est le modèle GR2M.

CHAPITRE III
MODELISATION CLIMATIQUE

3. MODELISATION CLIMATIQUE

Introduction

Les modèles climatiques constituent actuellement des outils indispensables pour l'analyse de la vulnérabilité des populations.

Un modèle climatique est un logiciel très complexe pour reproduire le comportement du climat terrestre. Il décrit le comportement et les interactions entre les différentes composantes du système climatique sous forçage externe.

Avec les informations fournies, il devient possible de prévoir les impacts négatifs potentiels des changements climatiques tout en favorisant un développement résilient du climat.

Il existe deux types de modèle climatique, global et régional, la résolution spatiale est le facteur déterminant entre les modèles climatiques globaux et régionaux.

3.1. Les modèles climatiques

Un modèle climatique est une représentation numérique du système climatique composé de l'atmosphère, la surface de la terre, l'hydrosphère, la cryosphère et la biosphère.

Cette représentation est essentiellement basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants ainsi que sur leurs processus d'interaction, et représentant la totalité ou une partie de ses propriétés connues (Farah, 2014).

Les modèles climatiques sont des outils de prédilection utilisés par les chercheurs pour comprendre, attribuer les variations climatiques du passé et faire des projections sur l'avenir. Ces modèles présentent de nombreuses similitudes avec les modèles de prévision météorologique. Ils reposent sur des formulations et des méthodes de calcul proches, et partagent un certain nombre d'outils et logiciels (Elmeddahi, 2016).

3.2. Scénarios climatiques ou scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES)

Un scénario est une description vraisemblable, cohérente et homogène d'un état futur du globe (GIEC, 2001). Généralement, ils sont obtenus à partir de projections qui sont souvent fondés sur des informations complémentaires provenant d'autres sources; quatre genres de scénarios sont communément utilisés dans l'étude du changement climatique : le scénario climatique, le scénario d'émissions, le scénario de forçage radiatif et le scénario du RSSE (GIEC, 2007).

Pour les scénarios climatiques, la communauté scientifique du GIEC a défini un ensemble de quatre nouveaux scénarios, appelés profils représentatifs d'évolution de concentration des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) désignés par (RCP). Ces RCP sont identifiés par leurs forçages radiatifs à l'horizon 2100 et plus (2300) exprimés en W/m^2 tel que :

- RCP 2,6 : $2,6 W/m^2$ (scénario d'atténuation)
- RCP 4,5 : $4,5 W/m^2$ (scénario de stabilisation : scénario optimiste).
- RCP 6,0 : $6,0 W/m^2$ (scénario de stabilisation).
- RCP 8,5 : $8,5 W/m^2$ (scénario d'émission de gaz à effet de serre très élevé : scénario pessimiste).

Les scénarios d'émission du Rapport Spécial (généralement appelés scénarios SRES) sont au nombre de 40, sont groupés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2) et correspondent à des évolutions contrastées des forces motrices qui influencent les émissions de GES : la démographie, l'économie, les dimensions sociales et politiques, et les progrès technologiques.

Ces scénarios se définissent par :

- Le scénario « A1 » repose sur l'hypothèse d'une croissance économique rapide de l'économie mondiale associée à une croissance de la population mondiale jusqu'au milieu du 21^e siècle, suivie d'une légère baisse de celle-ci et de l'introduction rapide de nouvelles technologies énergétiques efficaces. Les économies régionales se développent fortement et la prospérité est répartie équitablement. Ils se subdivisent en trois groupes:
 - ✓ en « A1FI », le monde continue principalement de fonctionner avec une forte intensité de combustibles fossiles.
 - ✓ en « A1T » avec des sources énergétiques autres que fossiles.
 - ✓ en « A1B » avec un équilibre entre les sources énergétiques (mélange des deux).
- Le scénario « A2 » (pessimiste) quant à lui il décrit un monde qui reste divisé. Dans l'ensemble, il n'y a pas de redistribution des ressources naturelles disponibles, des connaissances technologiques et du bien-être entre les régions riches et les régions pauvres (monde hétérogène).
- Le scénario « B1 » suit le scénario A1, mais le monde se tourne plus rapidement vers une économie axée sur les services avec une introduction rapide de technologies propres et durables.
- Le scénario « B2 » (optimiste) parle d'un monde axé sur la préservation de l'environnement et de l'égalité sociale, mais qui part de solutions régionales en matière

de durabilité économique, sociale et écologique.

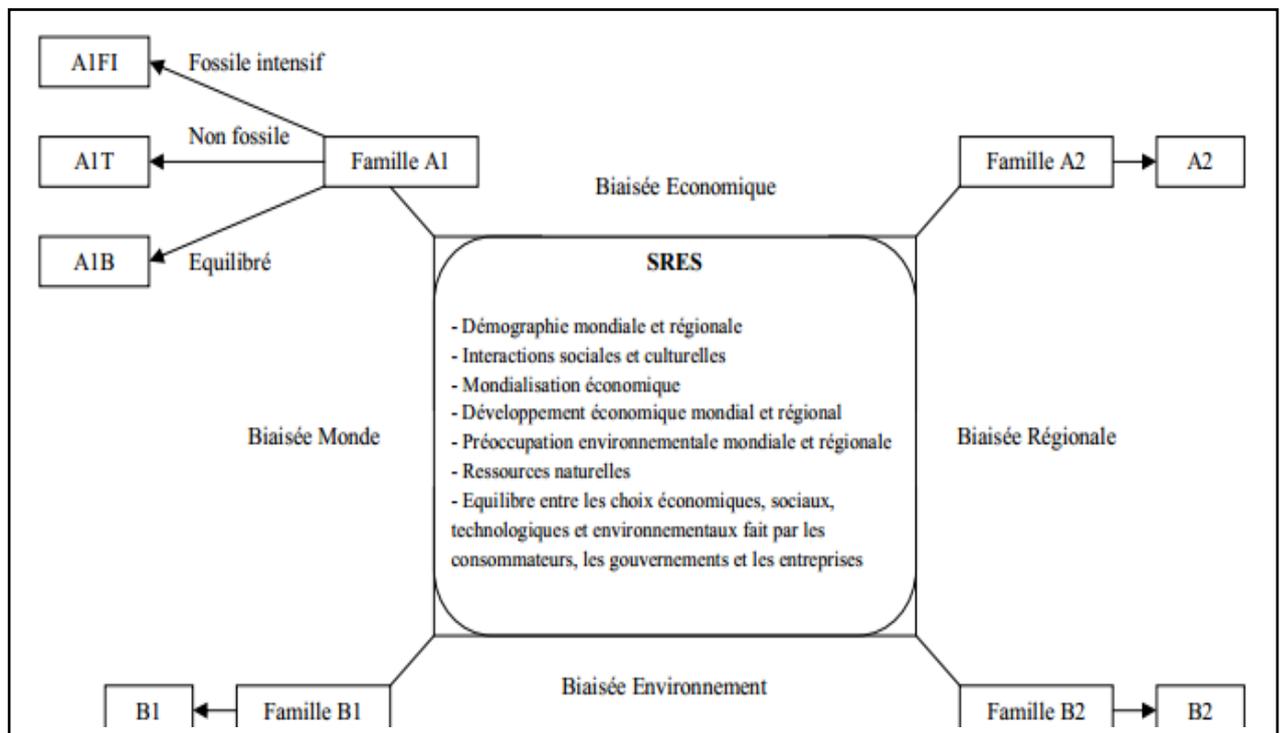


Figure 3-1 : Les scénarios d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) (Bernardara, 2007)

3.3. Description du modèle climatique

La modélisation climatique a recours à l'utilisation de modèles physiques du climat dans une zone géographique donnée. Pour étudier le climat tout en prenant en considération l'ensemble de ces interactions, il est donc nécessaire d'adopter une approche globale. Divers modèles de degrés de complexités variés peuvent être utilisés pour représenter le système climatique.

A ce titre, les modèles de circulation générale (MCG) sont des modèles globaux à larges mailles qui donnent des tendances de long terme sur de larges zones.

Ces modèles sont désormais connus par les modèles de circulation générale atmosphérique (MCGA) puisqu'ils prennent en compte une partie atmosphérique du système climatique et ses interactions avec la surface terrestre continentale. Ces MCGA peuvent être couplés avec des modèles physiques océaniques pour donner des modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO).

En ajoutant à ces derniers la biosphère, le cycle du carbone et la composition chimique de l'atmosphère on obtient le modèle « Earth system model » (ESM).

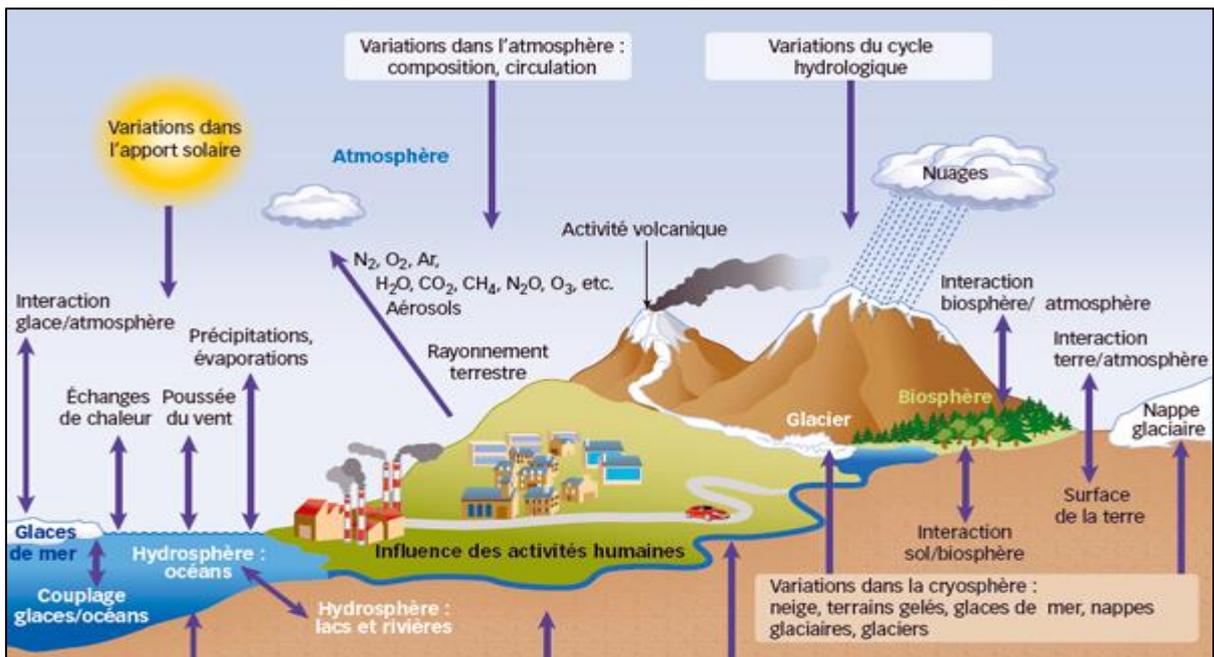


Figure 3-2 : Représentation des différents compartiments du système climatique et de leurs interactions (GIEC, 2007)

3.4. Type de modèles climatiques

Il existe deux grands types de modèles climatiques. Ce sont les modèles climatiques globaux (MCG) et les modèles climatiques régionaux (MCR).

- **Modèles climatiques globaux « MCG »**

Comme leur nom l'indique, la grille de calcul des MCG offre une couverture globale c'est-à-dire de la planète entière (Taibi, 2016).

Les modèles de climat global (MCG) sont des modèles climatiques permettant de simuler la réponse du système climatique à la variation de la concentration des Gaz à Effets de Serre (GES) fournissant des informations de prévision fiable. Ces derniers utilisent une résolution spatiale de (200x200Km), comprenant dans un contexte virtuel 30 niveaux verticaux sous forme de cubes empilés les uns par-dessus les autres, de la surface terrestre jusqu'à la fin de l'atmosphère, renfermant des équations et des caractéristiques propres à chacun.

- **Modèles climatiques régionaux « MCR »**

Lorsque le domaine ne couvre qu'une sous-région de la planète, on a affaire à un modèle régional de climat (MCR) à aire limitée. (Taibi, 2016).

Le modèle climatique régional est obtenu en forçant les conditions aux limites régionales par un modèle global en utilisant une résolution spatiale de (50x50Km ; 25x25Km ; 12x12Km), ce qui permet en particulier d'affiner la qualité de l'information

issue de la modélisation. Autrement dit d'évaluer l'impact du changement climatique, de procéder aux planifications et de suggérer les moyens d'adaptations dans de nombreuses régions vulnérables du monde. Ajouté à cela, le modèle fournit des projections avec beaucoup plus de détails et une représentation plus précise des événements extrêmes localisés.

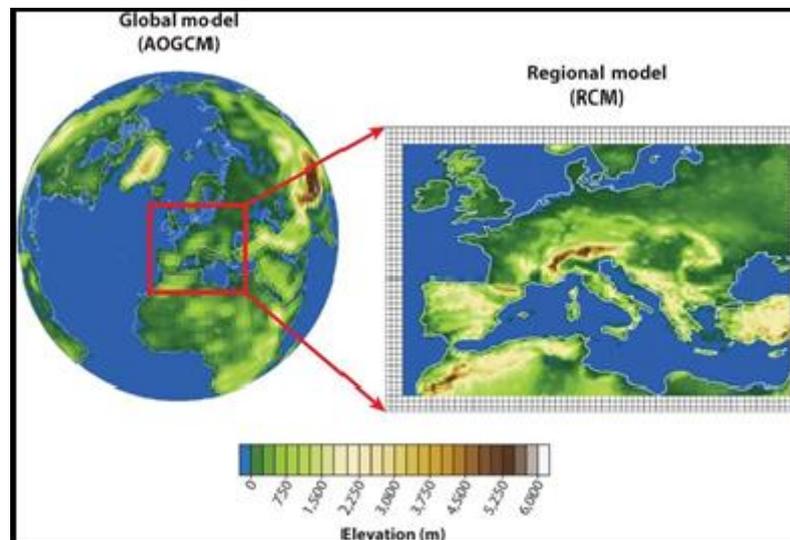


Figure 3-3 : Vue schématique de la technique de régionalisation (Prignon, 2016)

3.5. Modèles climatiques régionaux du projet CORDEX

Dans le contexte de la modélisation régionale du climat, plusieurs projets climatiques ont été développés parmi eux les projets : PRUDENCE, STARDEX, ENSEMBLE et le dernier projet CORDEX.

Ces projets ont permis de reconstruire des données simulées passées ainsi que la projection des données futures pour un ensemble de variables climatiques (pluie, température, pression....) issues des sorties des modèles climatiques régionaux (MCR).

S'agissant du projet CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment), il convient de souligner qu'il a été lancé par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) visant selon (Jones et al. 2011) deux objectifs :

- Fournir un cadre d'évaluation et de vérification de l'efficacité des modèles.
- Concevoir une série d'expériences destinées à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation.

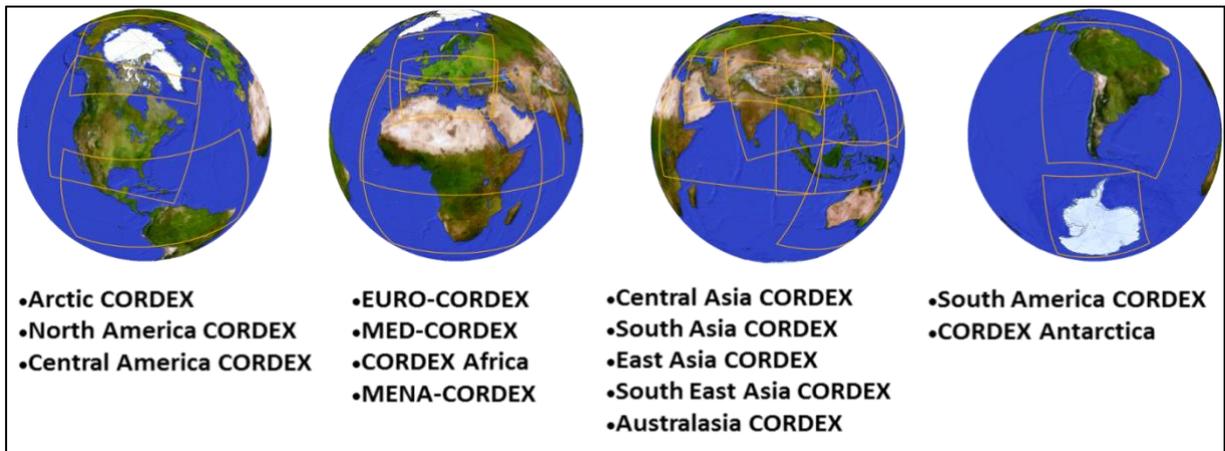


Figure 3-4 : Quatorze domaines Cordex couvrant toutes les zones terrestres et l'Arctique (WCRP, 2018)

3.6. Modèles climatiques régionaux du projet CORDEX- Africa

Le projet CORDEX a été désigné pour son lancement dans l'Afrique, pour deux raisons principales :

- La vulnérabilité importante de l'Afrique face au changement climatique.
- Le manque de simulations du climat en Afrique réalisées par des MCR.

Le projet CORDEX- Africa travaille avec des données de réductions d'échelle CORDEX sur le domaine africain. Il simule des données climatiques depuis 1950 jusqu'à l'horizon 2100 en utilisant une résolution spatiale de 50Km et qui concerne que deux scénarios des RCP4.5 et RCP8.5.

En regroupant un grand ensemble de simulations conduites par différents MCR sur le même domaine d'intégration, il est possible premièrement, de comparer les sorties des différents MCR entre elles et deuxièmement, de faciliter les analyses du climat en Afrique.

C'est ainsi que les MCR ont utilisé les conditions aux limites de 8 modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) de la 5ème phase du projet d'inter comparaison des modèles couplés (CMIP5) pour reproduire une nouvelle version des modèles climatiques régionaux pour l'Afrique (Anza, 2019).

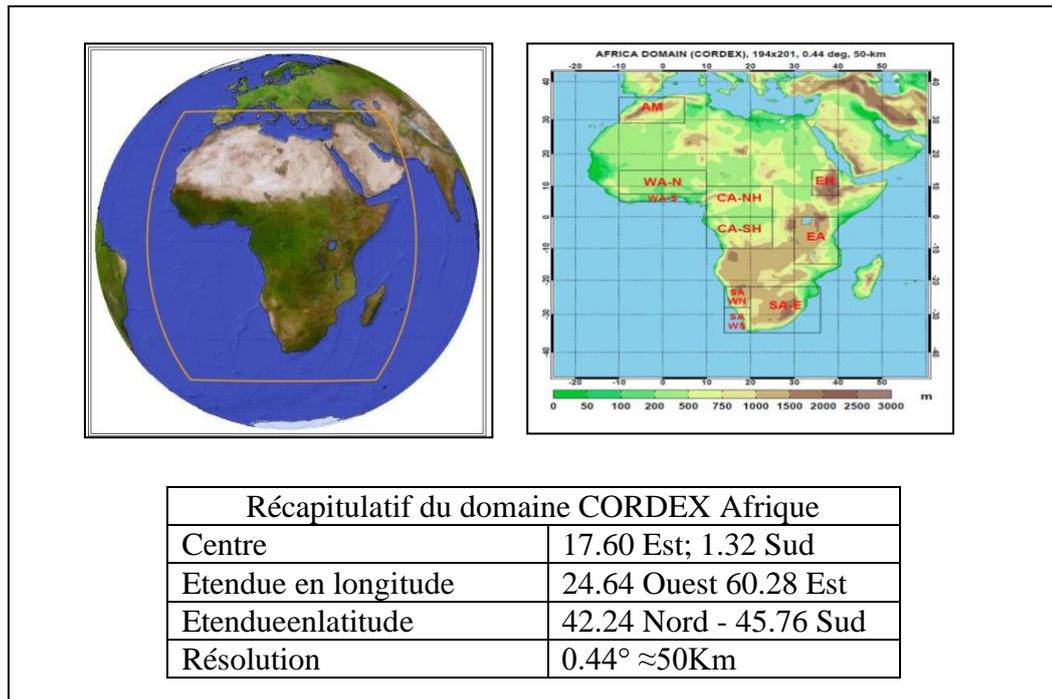


Figure 3-5 : Domaine d'application du CorDEX –Africa

3.7. Application du modèle CorDEX-Africa en l'Algérie

En Algérie, des études récentes enquêtent sur les changements climatiques moyennant des modèles climatiques régionaux (MRC) avec des données de réductions d'échelle CORDEX sur le domaine africain.

Zeroual et al (2018) ont analysé les changements climatiques pour la période 1951 à 2098 à l'aide de données climatiques d'observation et de simulations climatiques régionales sur l'Algérie par l'étude de 15 modèles climatiques régionaux du projet CorDEX-Africa sous deux scénarios de forçages radiatifs (RCP4.5 et RCP 8.5). Les résultats ont montré que les modèles RCA4-MPI-ESM-LR, CCLM4-8-17-CNRM-CM5, RCA4-IPSL-CM5A et RCA4-MIROC5 sont les plus performants.

Une évaluation des signaux de changement des précipitations et des températures projetés en Algérie étudiée par Zeroual et al(2020) à l'aide des simulations climatiques régionales RCA4 qui ont été évaluées sur la période historique 1951–2005, puis utilisées pour examiner les projections de précipitations et de températures à la fin du 21^{ème} siècle selon deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Toutes les simulations de modèles prédisent une expansion de la zone climatique désertique au détriment des zones climatiques tempérées et steppiques qui semble particulièrement s'accroître à la fin du siècle selon le scénario RCP8.5.

Au Est de l'Algérie, Taibi et al(2020) ont évalué l'impact des changements climatiques sur l'évolution future des écoulements au barrage de Ain Dalia d'ici la fin du 21^{ème} siècle par l'utilisation des simulations de 4 modèles climatiques régionaux du projet Cordex-Africa (RCA4-MPI-ESM-LR, RCA4-IPSL-CM5A-MR, RCA4-MIROC5 et RCA4-CNRM-CM5) sous deux scénarios de forçages radiatifs (RCP4.5 et RCP 8.5) montrant que les modèles RCA4-CNRM et RCA4-MPIESM-LR sont les plus performants. Les simulations prédisent une différence dans l'évolution future des précipitations et des températures simulée par les deux modèles. Le modèle RCA4-CNRM a montré pour le scénario pessimiste, une augmentation des températures simulées de 1,3 °C en 2050 et de 3,7°C en 2100 accompagnée par une diminution de la pluviométrie en saisons humides qui varie de moins 5% à l'horizon 2050 à 28% à l'horizon 2100.

L'évolution temporelle des caractéristiques des événements de sécheresse du bassin versant du barrage de Beni Bahdel, au nord-ouest de l'Algérie a été évalué par Bouabdelli et al (2020) pour la période de 1941 à 2100 en utilisant des simulations du modèle climatique régional RCA4 imposé par le modèle de circulation mondiale MPI-ESM-LR dans deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les résultats montrent une amplification des fréquences et des durées de sécheresse dans le futur selon le scénario RCP8.5.

Conclusion

Cette partie a mis en évidence que la résolution spatiale d'un modèle climatique est déterminante dans les études d'impacts des changements climatiques. La technique de downscaling est donc primordiale pour tenir compte de plus de phénomènes influençant la variabilité climatique à l'échelle régionale. Les scénarios climatiques permettent d'appréhender les conséquences du réchauffement climatique à travers les projections climatiques simulés par le projet CORDEX-Africa qui offre des simulations de plusieurs variables climatiques jusqu'à 2100.

CHAPITRE IV

CONTRIBUTION DU MODELE GR2M ET DES MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX A LA PREVISION DES ECOULEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED EL HARRACH AMONT

4. CONTRIBUTION DU MODELE GR2M ET DES MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX A LA PREVISION DES ECOULEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED EL HARRACH AMONT

4.1. Présentation du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont

4.1.1. Situation géographique

Située à 35 km au sud d'Alger et à 17 km au Sud- Est de Blida, la région d'étude fait partie du bassin côtier du centre "Mitidja" (grand bassin côtier algérois), entre les latitudes 36° 20' et 36° 30' Nord et entre les longitudes 2°50' et 3°10' Est, avec une superficie totale de 387 km².

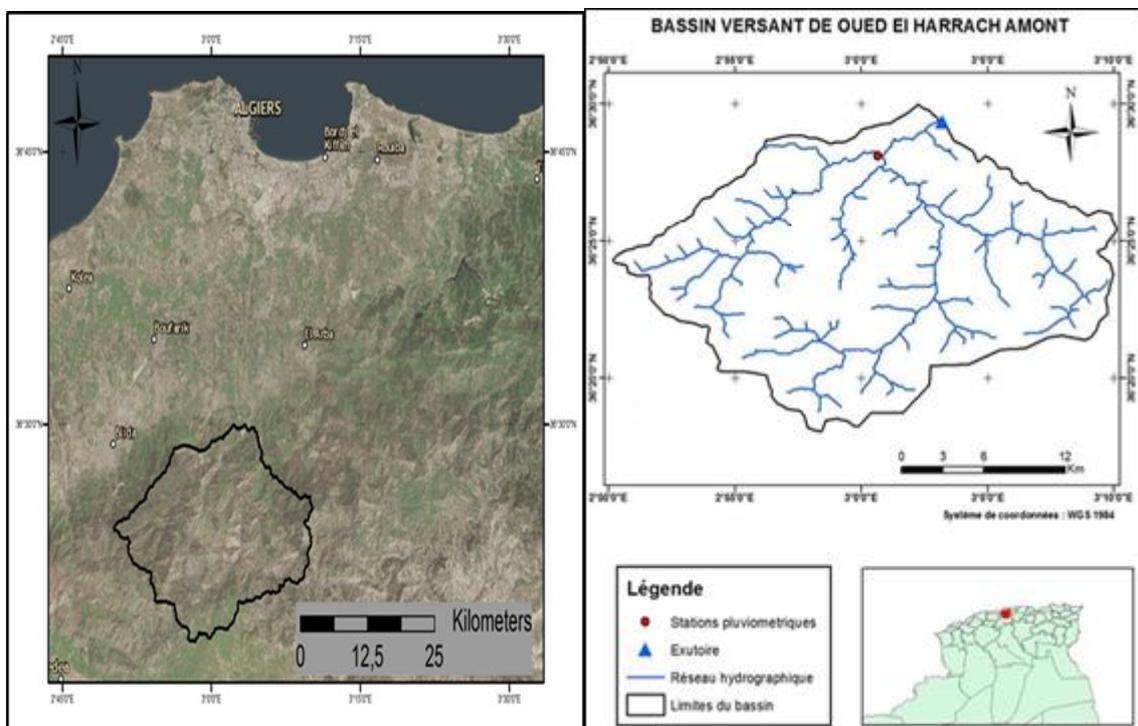


Figure 4-1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont

4.1.2. Caractéristiques géomorphologiques

Les caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant à étudier sont considérées comme des facteurs importants intervenant dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques du bassin versant étudié se résument dans le tableau ci-après :

Tableau 4-1 : Caractéristiques hydro-morphologiques du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)

Caractéristiques	Unité	Valeurs
Surface (A)	km ²	387
Périmètre (P)	km	75
Longueur du rectangle équivalent (L)	km	19,7
Largeur du rectangle équivalent (l)	km	19,6
Altitude maximale (H _{max})	m	1629
Altitude moyenne (H _{moy})	m	830
Altitude minimale (H _{min})	m	146
Indice de compacité (K _c)	/	1,06
Longueur du cours d'eau principal (L _{cp})	km	35
Indice de pente de Roche	/	0,24
Densité de drainage	Km/Km ²	5,2
Coefficient de torrencialité	/	69,2
Temps de concentration (t _c)	h	6,27

4.1.3. Relief du bassin

Le bassin versant de l'Oued el Harrach amont correspond à une zone montagneuse, où 85% de l'espace est recouvert de forêts qui se manifeste comme une barrière rocheuse à topographie assez complexe.

Les courbes hypsométriques sont d'une grande importance dans l'étude du relief du bassin versant.

C'est une répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

Selon la carte des courbes hypsométriques de la zone d'étude (figure 4-2), l'altitude moyenne est de 843m.

En effet, le relief du bassin versant prend de l'ampleur du nord vers le sud. L'altitude à l'exutoire (station Rocher des pigeons) est de 268m vers une côte maximale de 1426m et une pente moyenne de 41,56% (figure 4-4).

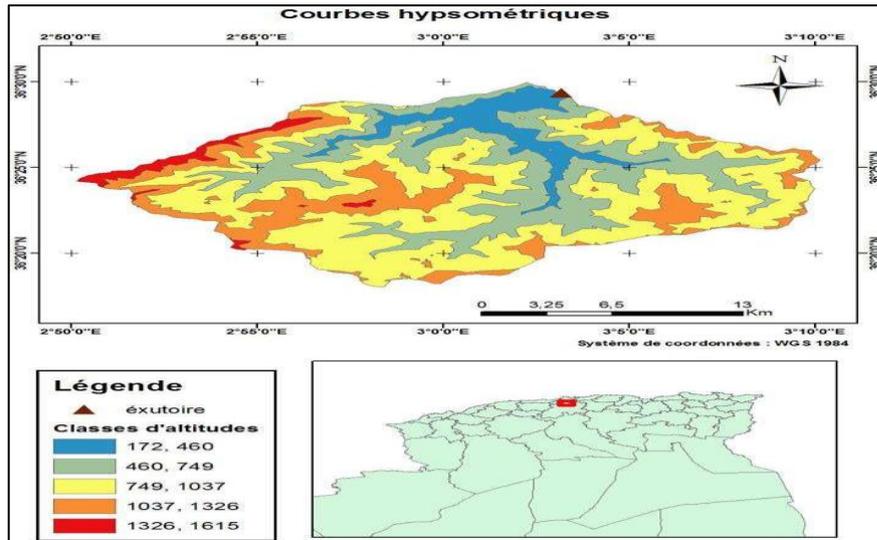


Figure 4-2 : Courbes hypsométriques du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)

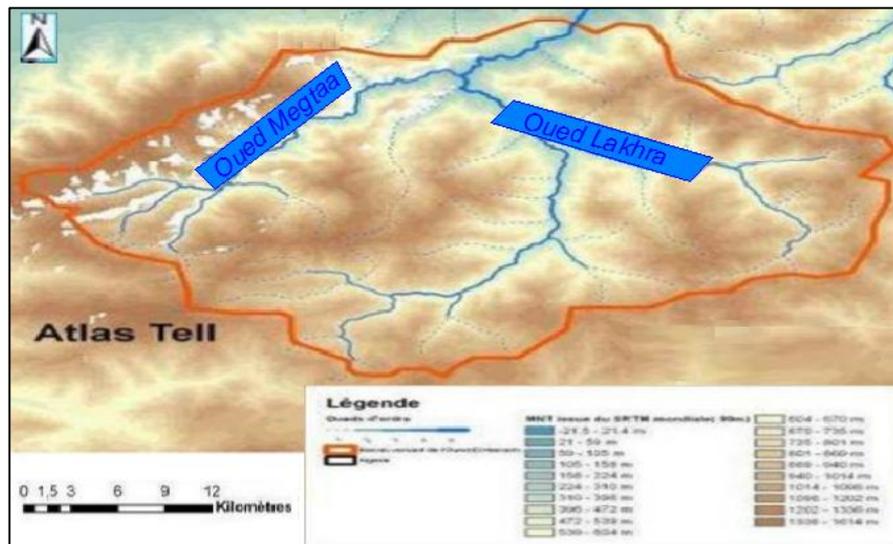


Figure 4-3 : Carte de la topographie du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)

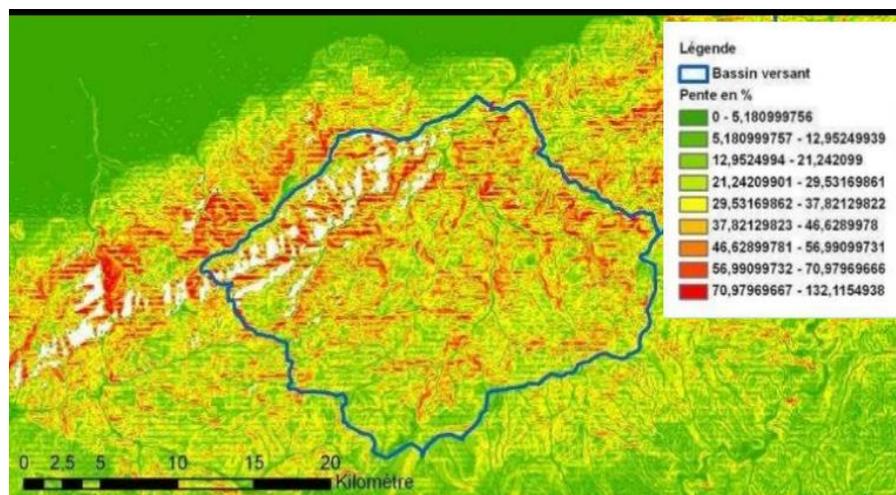


Figure 4-4 : Carte de la pente du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)

4.1.4. Caractéristiques géologiques du bassin

Le bassin versant de l'Oued EL Harrach amont se constitue essentiellement d'épaisses séries d'âge crétacé. Ces formations résistantes de grés, poudingues du miocène, calcaire marneux du crétacé moyen et des schistes du crétacé inférieur constituent 54% du bassin.

Les formations érodables constituent 18% de la superficie, elles se composent de marnes schistoïdes, et d'argiles noires du miocène et du crétacé supérieur (figure 4-5).

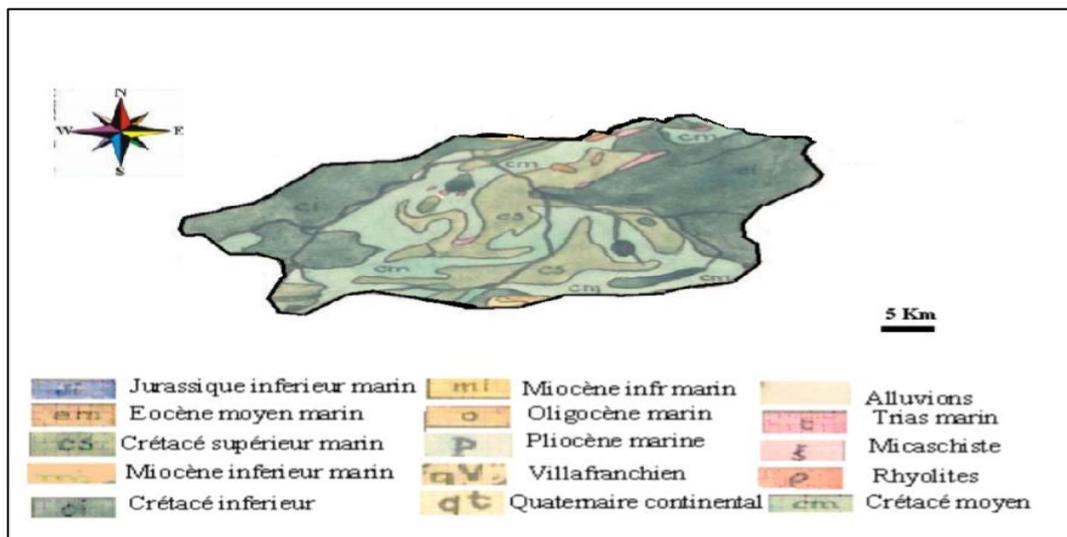


Figure 4-5 : Géologie du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont (ANRH)

4.1.5. Ressource en eau

L'importance de la pente et la nature de la roche (Schistes) sont deux facteurs favorisant l'installation d'un réseau hydrographique creusé profondément. Sur les versants septentrionaux dans le massif Blidéen (Atlas tellien), on distingue de nombreux petits ruisseaux qui se regroupent en deux grands oueds : l'Oued MAGTAA et l'Oued LAKHRA au Sud- Ouest de Hammam Melouane formant ainsi l'Oued El Harrach.

Concernant les eaux souterraines au niveau de la zone d'étude, la figure 4-6 montre clairement l'absence de ces derniers compte tenu des formations résistantes de grés, poudingues du miocène, calcaire marneux du crétacé moyen et des schistes du crétacé inférieur qui constituent 54% du bassin.

Tableau 4-2 : Présentation des stations pluviométrique et hydrométrique du bassin versant de l'Oued El Harrach Amont

Non de la station	Code de la station de l'ANRH	X(m)	Y(m)	Z(m)	Période
La passerelle	021307	528,05	352,05	260	1977-2019
Rocher des pigeons	021301	532,45	355,75	268	1972-1994 et 2003-2014

4.2.2. Climatologie

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen, ce dernier est caractérisé par la sécheresse de la saison estivale, des hivers relativement humides et doux avec une température moyenne d'environ 17,8°C et d'un cumul de pluie qui atteint les 750 mm.

- Températures

La distribution moyenne interannuelle de la température durant la période de 1972 à 2016 de la station Dar el Beida (Figure 4-8), montre d'après que le mois d'Août affiche une valeur maximale de 26°C et le mois le plus frais est celui de Janvier avec 11°C avec une température moyenne interannuelle de 19°C.

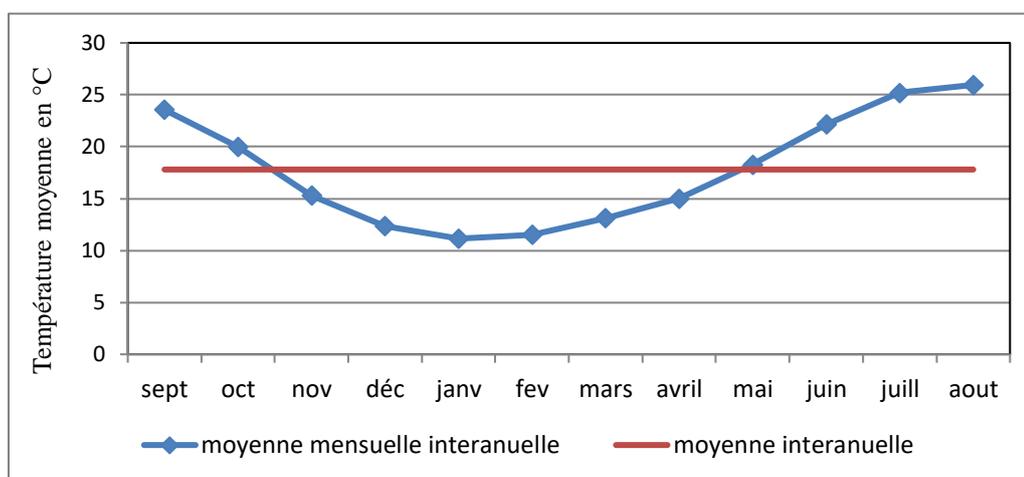


Figure 4-8 : Variabilité interannuelle des températures de la station de Dar El Beida de 1972 à 2016

- Pluviométrie

On remarque depuis la figure 4-9 qui représente la variabilité interannuelle des précipitations de la station « La passerelle » que le mois le plus pluvieux est celui de Janvier avec environ 100,4 mm et le mois de Juillet est le moins pluvieux avec 4,3 mm sachant que la moyenne interannuelle des précipitations est égale à 62,11 mm.

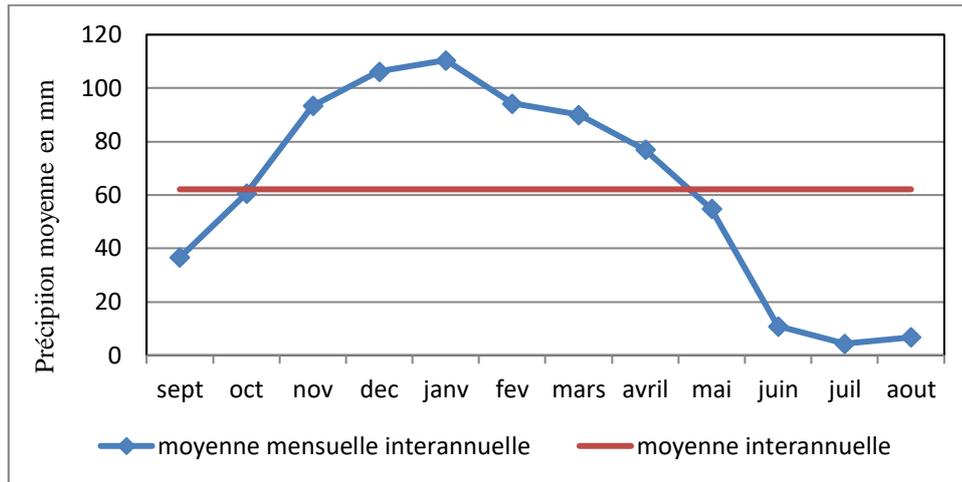


Figure 4-9 : Variabilité interannuelle des précipitations de la station « La passerelle » de 1977 à 2019

- Evapotranspiration

La formule de Thornthwaite permet une simple estimation de l'évapotranspiration mensuelle ETP(m) grâce à la formule suivante :

$$ETP(m) = 16 \left[\frac{10 * \bar{T}(m)}{I} \right]^a * F(m, \varphi)$$

Avec :

- ETP(m) : l'évapotranspiration du mois (m=1 à 12) en mm
- $\bar{T}(m)$: moyenne interannuelle de températures du mois en °C
- a : $0.016 * I + 0.5$
- I : indic thermique annuel sachant que :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \text{ et } i(m) = \left[\frac{\bar{T}(m)}{5} \right]^{1.514}$$

Les résultats de calculs des ETP ont permis de tracer la interannuelle des ETP pour le bassin versant de 1972 à 2016 selon la Figure 4-10. En effet, l'évapotranspiration atteint une valeur maximale pendant le mois de Juillet avec 150,25 mm et une valeur minimale pendant le mois de Janvier avec 23,03 mm avec moyenne interannuelle des ETP égale à 73,13 mm.

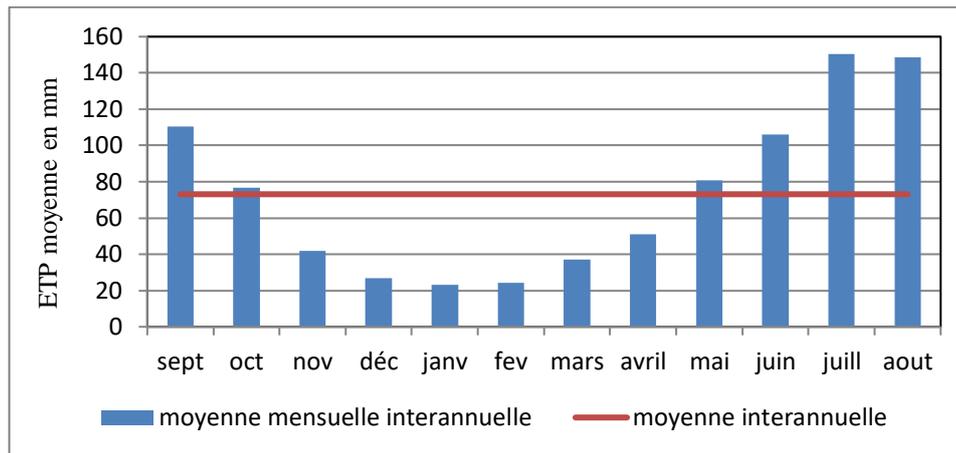


Figure 4-10 : Variabilité interannuelle des ETP pour le bassin versant de 1972 à 2016

4.3. Calage et validation du modèle GR2M sur le bassin versant

L'exploitation du modèle de Génie Rural (GR) du CEMAGREF à pas de temps mensuel (GR2M) ne peut se faire sans les deux étapes de calage et de validation. Le critère de Nash est utilisé pour juger la performance du modèle.

Durant l'étape du calage au cours de la période sept 1981- Août 1991, le critère de Nash a atteint 80,1% avec un coefficient de détermination R^2 égal à 81,1% permettant ainsi la validation du modèle durant la période Sept 2003– Fév 2013 avec un critère de Nash de 70,8% et un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 62,4%. Les résultats mentionnés dans le tableau 4-6 indiquent une acceptable corrélation entre les simulations du modèle et les observations dans l'étape de calage ($r=88,8\%$) et celle de la validation ($r=79,8\%$).

Tableau 4-3 : Résultat de la modélisation pour les périodes de calage et de validation de la station pluviométrique « La passerelle »

Etape	Calage		Validation	
	Sept 1981 – Août 1991		Sept 2003 – Fév 2013	
Paramètres	X_1	179,08	X_1	179,08
	X_2	0,79	X_2	0,79
Critères de NASH	80,1%		70,8%	
Coefficient de détermination R^2	78,9%		62,4%	
Coefficient de corrélation r	88,8%		79,8%	
Biais	-3,68%		+1,40%	

En effet, l’exploitation du modèle sur le bassin versant de l’Oued El Harrach amont a permis de déterminer ses paramètres caractéristiques. Les résultats de la modélisation montrent une représentation satisfaisante des débits observés pour la station pluviométrique étudiée dans les étapes de calage et de validation (figures 4-11 et 4-12). Autrement dit les débits sont simulés de manière acceptable et répondent convenablement aux précipitations sachant que le modèle est moins biaisé vu que le biais est inférieur à 10% dans les deux étapes de la modélisation.

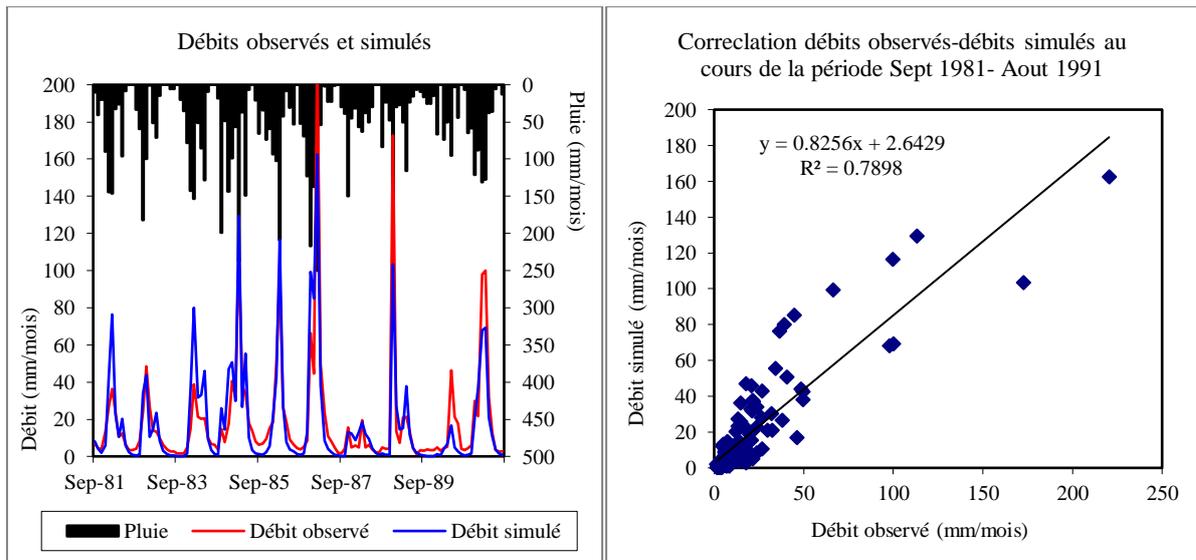


Figure 4-11 : Résultat de la modélisation pour les périodes de calage Sept 1981 – Août 1991 de la station pluviométrique « La passerelle »

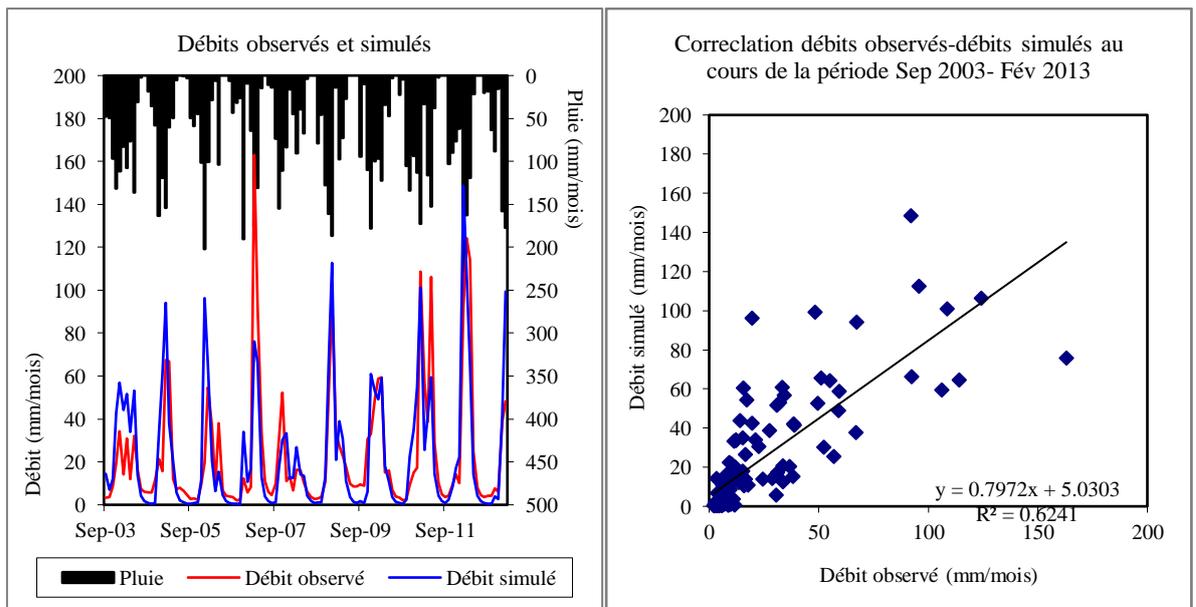


Figure 4-12 : Résultat de la modélisation pour les périodes de validation Sept 2003 – Fév 2013 de la station pluviométrique « La passerelle »

4.4. Evaluation des performances des Modèles Climatiques Régionaux

« MCR » :

Dans le but d'évaluer les performances des modèles climatiques régionaux MPI et CNRM, il importe d'établir une comparaison des données simulées (des précipitations et des températures) de deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à moyen terme (2045-2070) et à long terme (2075-2100) d'une part, avec les données simulées de la période de référence (1981-2005) d'autre part.

Cette comparaison se fera à l'aide de l'estimation du biais ou de la moyenne biaisée, exprimés par les formules suivantes :

$$Biais = 100 * \frac{\overline{X_{sim}} - \overline{X_{obs}}}{\overline{X_{obs}}} \quad \text{ou bien} \quad Moy_{biaisée} = \overline{X_{sim}} - \overline{X_{obs}}$$

Avec : $\overline{X_{obs}}$: Moyenne des observées et $\overline{X_{sim}}$: Moyenne des simulées.

4.4.1. Simulation des précipitations passées par les Modèles Climatiques Régionaux « MCR »

La représentation du cycle saisonnier des précipitations observées d'une part et celles simulées par les deux modèles MPI et CNRM d'autre part au titre de la période 1981-2005 montre pratiquement une même variation saisonnière des pluies (figure 4-13).

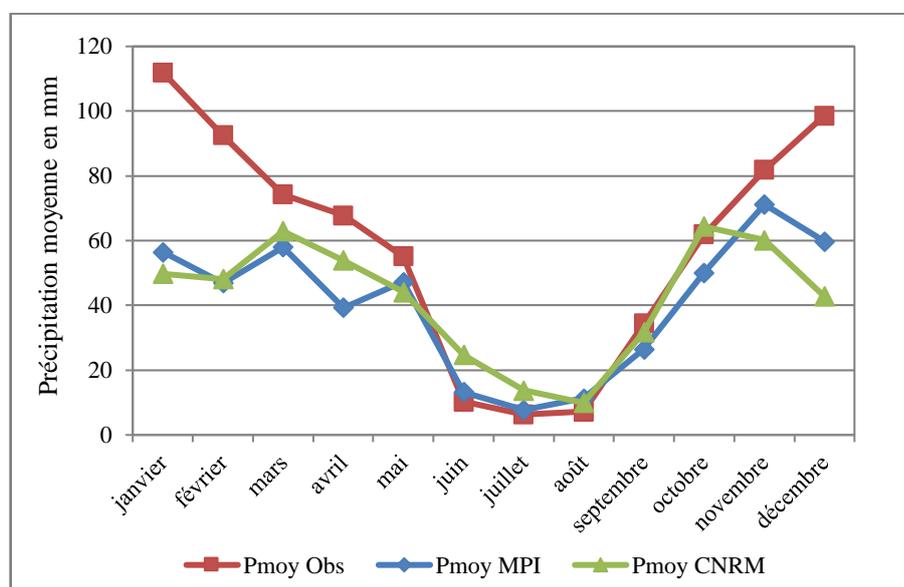


Figure 4-13 : Représentation du cycle saisonnier des précipitations

Les modèles climatiques MPI et CNRM ne reflètent pas la variabilité des précipitations mensuelles observées à l'échelle du Bassin versant de l'Oued El Harrach Amont. En effet, le biais calculé, à l'échelle mensuelle entre les pluies observées et simulées au cours de la période

1981-2005 varie en moyenne entre 3% et 140% ce qui dénote la constatation de l'insuffisance des modèles.

Aussi, le biais est plus important en hiver environ 50% et dépasse les 27% à l'échelle annuelle. Le biais élevé en période sèche (juin, juillet et août) s'explique par une faible quantité de pluie en cette saison.

Il en ressort que les deux modèles climatiques sous-estiment les précipitations durant la période humide (hiver et printemps), sachant que les quantités de pluies les plus importantes qui participent aux écoulements sont enregistrées au cours de cette période.

De ce fait, une correction du biais s'impose afin d'améliorer les simulations des précipitations de la zone d'étude.

Tableau 4-4 : Le biais estimé à l'échelle mensuelle entre les pluies observées et simulées entre la période 1981-2005

Biais	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	sept	Oct	Nov	Déc	Annuel
MPI en mm	-55,47	-45,65	-16,30	-28,45	-7,84	+2,96	+1,43	+4,08	-7,91	-11,84	-10,67	-38,85	-17,88
CNRM en mm	-62,20	-44,37	-11,32	-13,77	-10,94	+14,46	+7,42	+2,69	-2,63	+2,40	-21,63	-55,75	-16,30
MPI en %	-49,54	-49,32	-21,95	-42,00	-14,23	+28,78	+22,70	+56,44	-22,99	-19,11	-13,04	-39,40	-30,54
CNRM en %	-55,55	-47,93	-15,24	-20,33	-19,85	+140,52	+117,59	+37,17	-7,65	+3,88	-26,43	-56,54	-27,86

Tableau 4-5 : Le biais estimé entre les pluies observées et simulées saisonniers entre la période 1981-2005

Biais	Hiver	Printemps	Eté	Automne
MPI en mm	-46,66	-17,53	+2,83	-10,14
CNRM en mm	-54,11	-12,01	+8,19	-7,29
MPI en %	-46,17	-26,68	+35,56	-17,07
CNRM en %	-53,54	-18,28	+103,09	-12,27

4.4.2. Simulation des températures passées par les Modèles Climatiques Régionaux « MCR »

La comparaison entre les températures observées et celles simulées par les deux modèles MPI et CNRM au cours de la période 1981-2005 montre une variation similaire des températures mensuelles interannuelles.

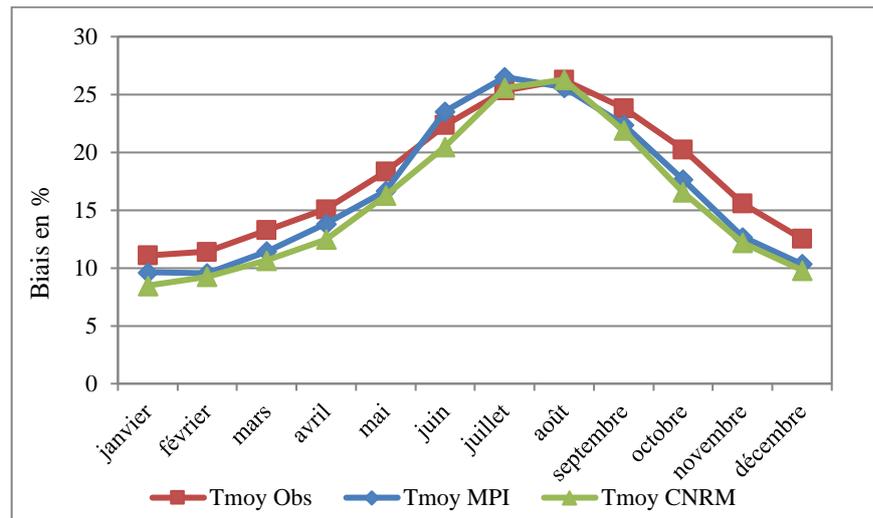


Figure 4-14 : Représentation du cycle saisonnier des températures

Les modèles climatiques MPI et CNRM reproduisent correctement les températures mensuelles observées à l'échelle du bassin versant étudié. Néanmoins, ils sous-estiment toutes les températures observées durant les mois de l'année avec un biais considérable variant entre 1,3°C et 3,7°C.

Des deux modèles nous constatons que le MPI présente une meilleure simulation des températures à l'échelle mensuelle, annuelle et même saisonnière par rapport au CNRM. Toutefois, une correction du biais sera nécessaire pour affiner les simulations des températures fournies par les modèles climatiques MPI et CNRM.

Tableau 4-6 : Le biais estimé à l'échelle mensuelle entre les températures observées et simulées entre la période 1981-2005

Biais	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	sept	Oct	Nov	Déc	Annuel
MPI en °C	-1,5	-1,9	-1,8	-1,3	-1,7	+1,2	+1,2	-0,6	-1,4	-2,6	-2,9	-2,2	-1,3
CNRM en °C	-2,6	-2,2	-2,6	-2,6	-2,1	-1,9	+0,2	0,0	-1,9	-3,7	-3,4	-2,7	-2,1
MPI en %	-13,10	-16,43	-13,84	-8,45	-9,10	+5,29	+4,55	-2,45	-6,02	-12,96	-18,61	-17,31	-7,22
CNRM en %	-23,46	-19,01	-19,80	-17,33	-11,32	-8,31	+0,83	+0,09	-8,07	-18,34	-21,80	-21,81	-11,84

Tableau 4-7 : Le biais estimé entre les températures observées et simulées saisonnières entre la période 1981-2005

Biais	Hiver	Printemps	Eté	Automne
MPI en °C	-1,8	-1,6	+0,6	-2,3
CNRM en °C	-2,5	-2,4	-0,5	-3,0
MPI en %	-15,69	-10,24	+2,29	-11,66
CNRM en %	-21,42	-15,67	-2,19	-15,14

4.4.3. Projection climatique à l'horizon 2070 et 2100

4.4.3.1. Projection des précipitations

Les modèles climatiques MPI et CNRM fournissent des données des pluies pour deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 jusqu'à l'année 2100. Pour étudier l'évolution future des précipitations de ces deux modèles climatiques, les données des pluies simulées à moyen terme (2045-2070) et à long terme (2075-2100) par les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 seront comparées aux données simulées de la période de référence (1981-2005).

Selon la figure 4-15, le modèle MPI simule une diminution de la pluviométrie aux horizons 2070 et 2100. Cette diminution est assez légère à l'horizon 2070 pour les trois saisons (Hiver, Printemps et Automne) par contre elle est un peu plus importante à l'horizon 2100.

Aussi, les simulations futures des précipitations à l'horizon 2100 du scénario optimiste (RCP4.5) montrent des diminutions de 1,45% en Hiver, 26,03% en Printemps et de 12,96% en Automne tandis que celles du modèle pessimiste (RCP8.5) prédisent des diminutions plus sévères d'environ 23,87% en Hiver, 55,44% en Printemps et de 37,92% en Automne.

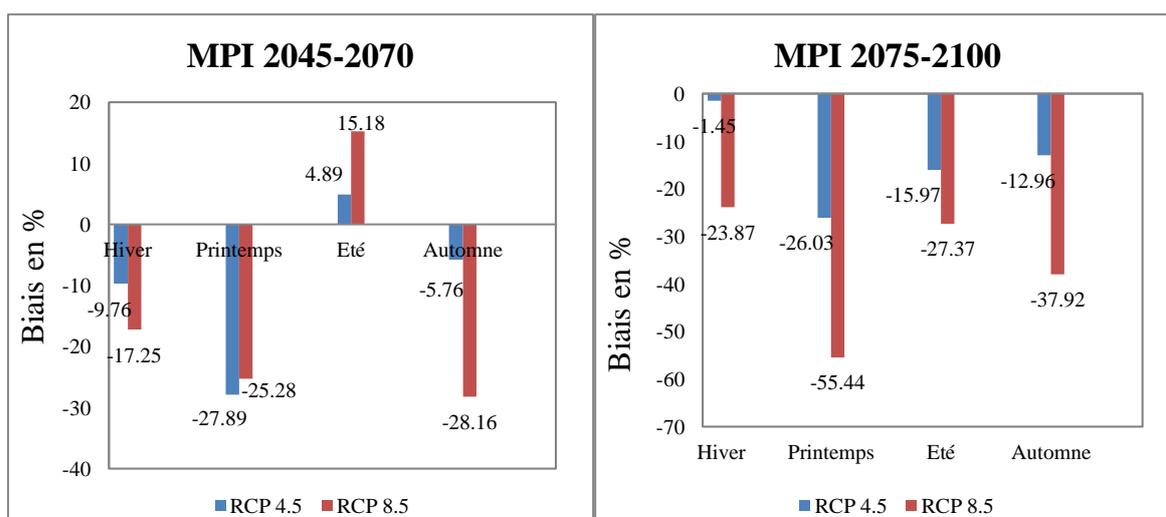


Figure 4-15 : Simulations des précipitations futures à l'échelle saisonnière par le modèle MPI

Le modèle CNRM prédit également une diminution des précipitations pour les trois saisons (Hiver, Printemps et Automne). Cette baisse est moins importante que celle estimée par le modèle MPI.

Les projections climatiques jusqu'à 2100 suivant le scénario le plus pessimiste (RCP8.5) prévoient une réduction allant jusqu'à 24,96% en Hiver, 25,97% en Printemps et de 29,94% en Automne (figure 4-16).

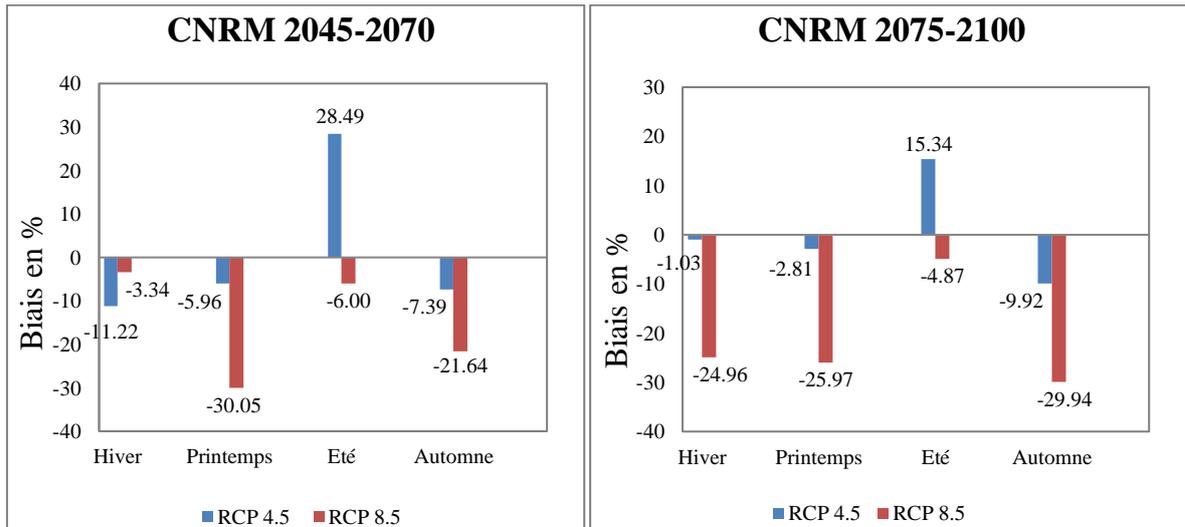


Figure 4-16 : Simulations des précipitations futures à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM

4.4.3.2. Projection des températures

L'évolution future des températures annuelles simulées par le modèle MPI montre une augmentation des températures pour les deux horizons étudiés. Selon la figure 4-17, le RCP 4.5 prévoit une élévation de 0,8°C pour l'horizon 2070 et de 1,1°C pour l'horizon 2100. Pour le scénario RCP8.5, cette élévation sera de 1,7°C à 2070 et 3,6°C à 2100.

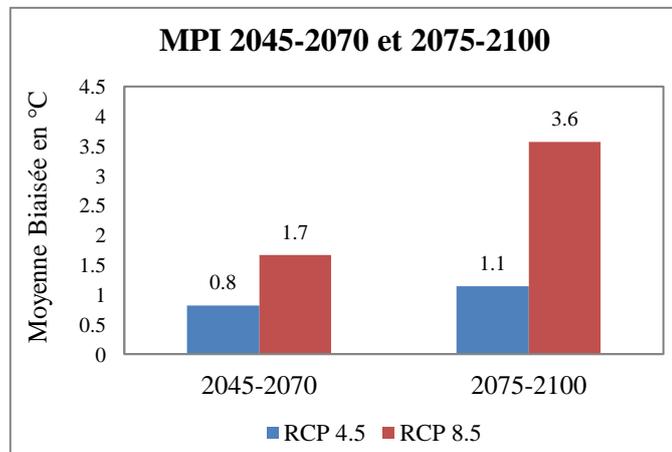


Figure 4-17 : Simulations des températures futures à l'échelle annuelle par le modèle MPI

A l'échelle saisonnière et d'après la figure 4-18, le modèle MPI prédit également une hausse des températures qui varie de 1°C à 1,7°C à 2070 et de 1,3°C et 2,3°C à 2100 selon le RCP4.5. Cette augmentation de température s'exprime selon le RCP8.5 à l'horizon 2070 entre 1,8°C et 2,6°C et à l'horizon 2100 entre 3,2°C et 4,8°C.

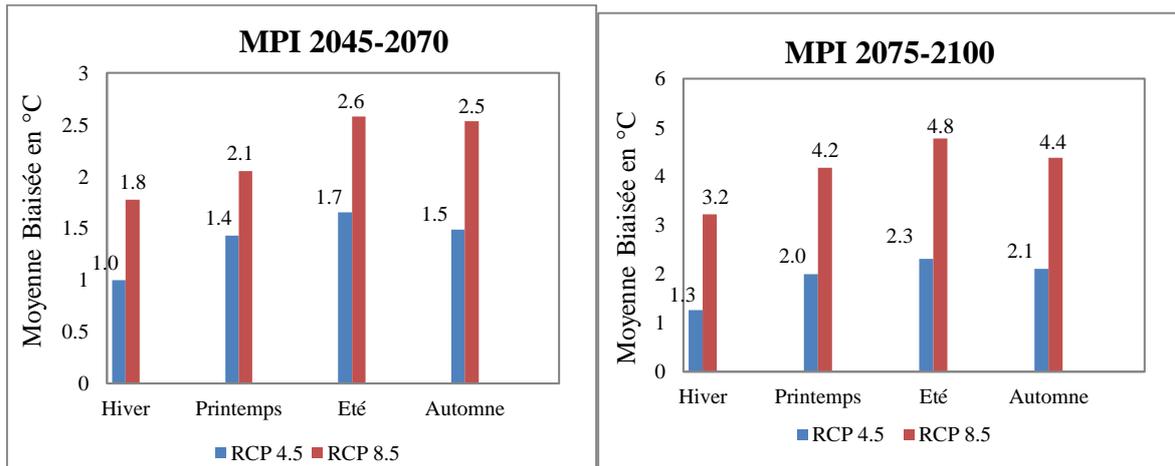


Figure 4-18 : Simulations des températures futures à l'échelle saisonnière par le modèle MPI

D'après la figure 4-19, les simulations à l'échelle annuelle pour le modèle CNRM, indique selon le RCP 4.5 une élévation des températures qui sera de 0,7°C à l'horizon 2070 et de 1,1°C à l'horizon 2100. Pour le scénario RCP8.5, cette élévation sera de 1,4°C à 2070 et 3,1°C à 2100.

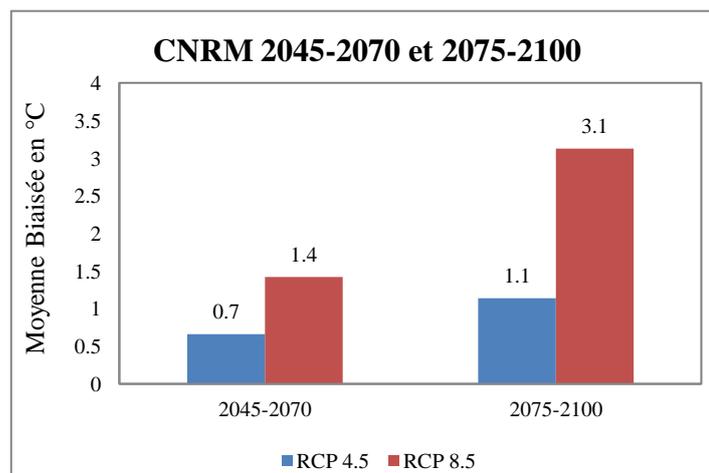


Figure 4-19 : Simulations des températures futures à l'échelle annuelle par le modèle CNRM

Pour l'échelle saisonnière, le modèle CNRM prévoit une légère augmentation des températures qui sera selon le RCP4.5 entre 0,8°C et 1,7°C à 2070 et entre 1,5°C et 1,9°C à 2100. Cette augmentation de température varie selon le RCP8.5 à l'horizon 2070 entre 1,6°C et 2,2°C et à l'horizon 2100 entre 3,0°C et 4,4°C (figure 4-20).

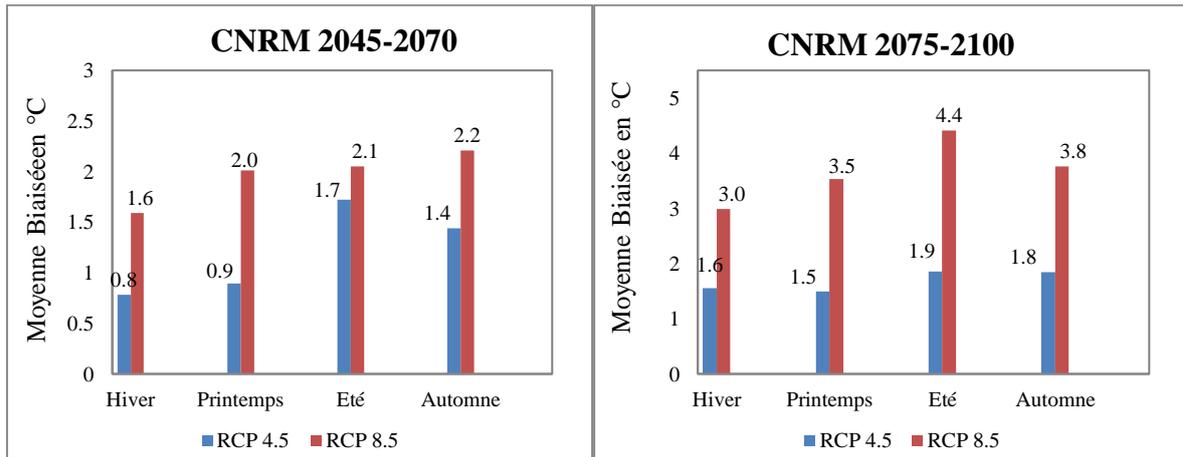


Figure 4-20 : Simulations des températures futures à l’échelle saisonnière par le modèle CNRM

D’après l’étude comparative de la variation des températures des deux modèles climatiques, il convient de dire que le CNRM permet de simuler des augmentations de température moins légères que celles estimées par le modèle MPI.

4.4.3.3. Projections des ETP

La hausse des températures participe aussi dans l’augmentation des évapotranspirations qui va influencer négativement sur la disponibilité des ressources en eau au niveau du bassin versant de l’Oued el Harrach Amont. Les ETP ont été calculées par la formule de Thornthwaite.

Le modèle MPI indique à l’échelle saisonnière, une légère augmentation des ETP qui ne dépasse pas les 11,08% à l’horizon 2070 pour les deux scénarios. Selon le RCP8.5, cette augmentation des ETP atteindra d’ici 2100 les 24,79% en période sèche (figure 4-21).

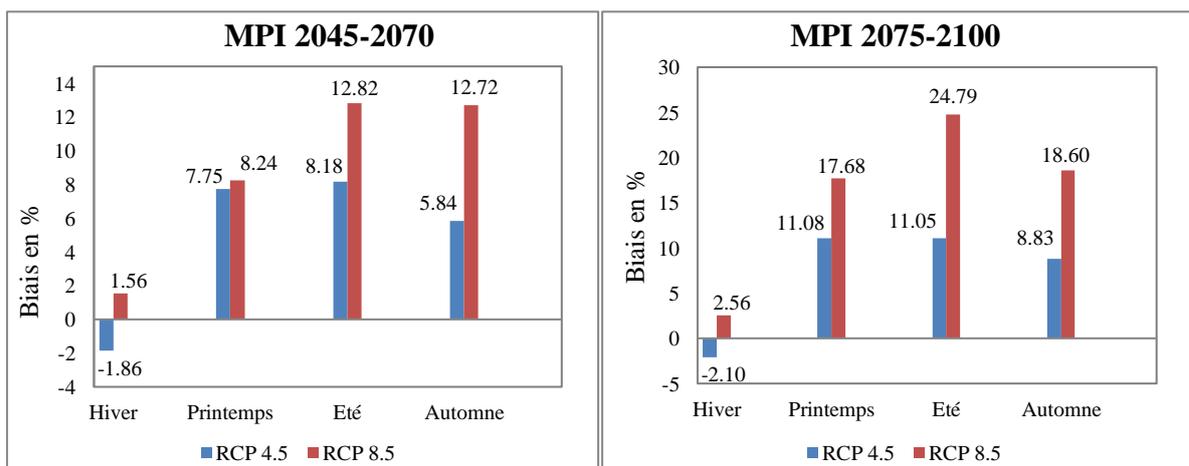


Figure 4-21 : Simulations des ETP futures à l’échelle saisonnière par le modèle MPI

Pour les deux périodes de projection, les simulations du modèle CNRM selon le RCP4.5 montrent une augmentation des ETP qui ne dépasse pas les 9,28% pendant l'Eté. Le modèle simule également d'ici 2100, une augmentation des ETP qui va atteindre 23,84% selon le scénario RCP8.5 (Figure 4-22).

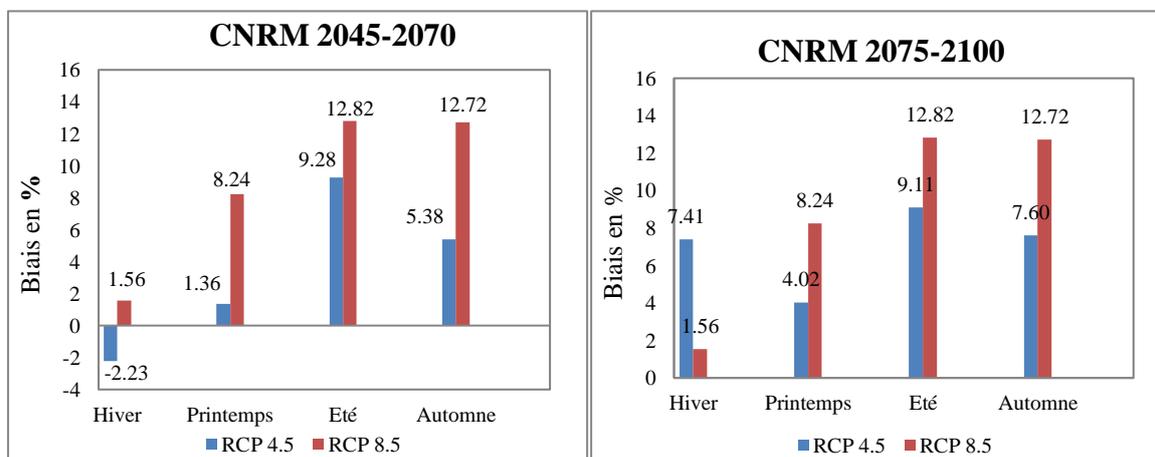


Figure 4-22 : Simulations des ETP futures à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM

4.4.3.4. Projections des écoulements

Pour étudier l'évolution future des écoulements, il faut tout d'abord déterminer les écoulements simulés de chaque scénario (RCP4.5 et RCP8.5) durant les périodes de référence et de projection.

Ils seront déterminés à l'aide du modèle hydrologique GR2M avec comme données d'entrée « les pluies simulées » et les « ETP simulés » en utilisant les paramètres $X1=179,08$ et $X2=0,79$ déterminés au préalable.

L'évolution future des écoulements annuels simulés par le modèle MPI selon la figure 4-23, montre une diminution de la lame d'eau écoulee pour les deux périodes de projections étudiées. Le RCP4.5 prévoit une diminution de 2,32 mm (26,77%) pour l'horizon 2070 et de 1,56 mm (18,75%) pour l'horizon 2100. Pour le scénario RCP8.5, cette diminution sera de 3,43 mm (41,23%) à 2070 et 5,38 mm (64,66%) à 2100.

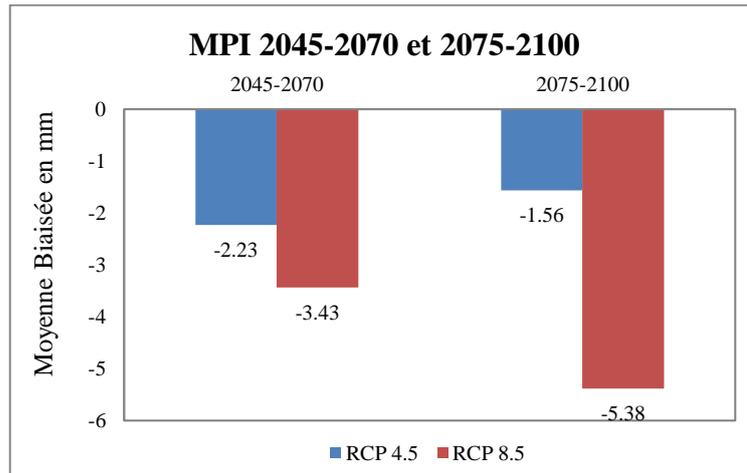


Figure 4-23 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle annuelle par le modèle MPI

A l'échelle saisonnière, la diminution de la lame d'eau écoulee est plus marquante en Printemps. Toutefois, le biais positif en Hiver à l'horizon 2100 est marqué par une augmentation des pluies surtout dans le mois de Décembre selon le RCP4.5 et dans le mois de Janvier selon le RCP8.5. Les projections suivant le RCP8.5 indiquent une diminution de 6,59 mm (42,22%) à 2070 et qui atteindra les 8,35 mm (53,49%) d'ici la fin 2100. (Figure 4-24).

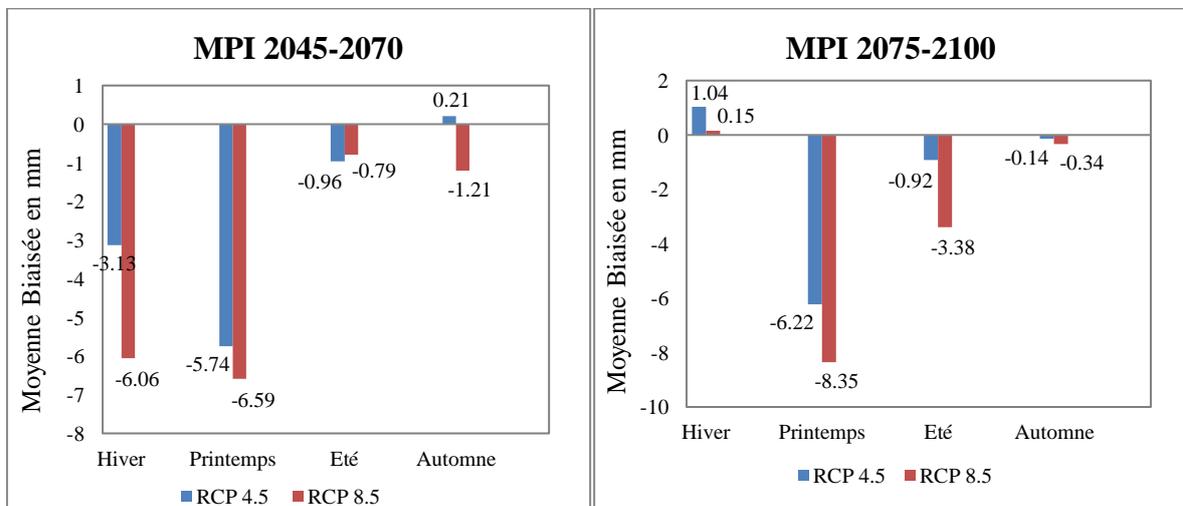


Figure 4-24 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle saisonnière par le modèle MPI

A l'échelle annuelle et d'après la figure 4-25, le modèle CNRM simule une diminution des lames d'eau écoulées au niveau de bassin versant étudié moins importante que celles simulées par le MPI. Selon les projections d'ici 2100, le scénario optimiste simule une diminution de 1,50 mm (16,52%) qui pourra atteindre les 4,79 mm (52,75%) suivant le RCP8.5.

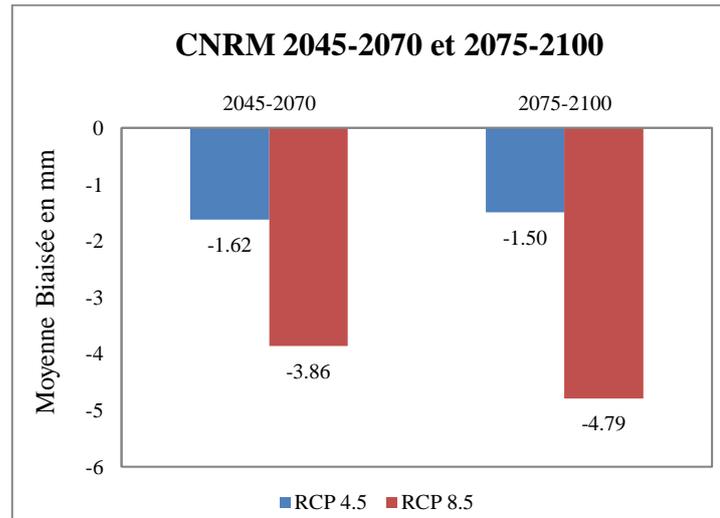


Figure 4-25 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle annuelle par le modèle CNRM

Le modèle indique selon les deux scénarios, une diminution des écoulements pour les trois saisons (Hiver, Printemps et Automne) pendant les deux périodes de projection étudiées. Selon le RCP 8.5, la diminution de la lame d'eau écoulée atteindra les 7,07 mm (40,82%) d'ici 2070 et atteindra aussi 7,72 mm (44,59%) d'ici 2100 (figure 4-26).

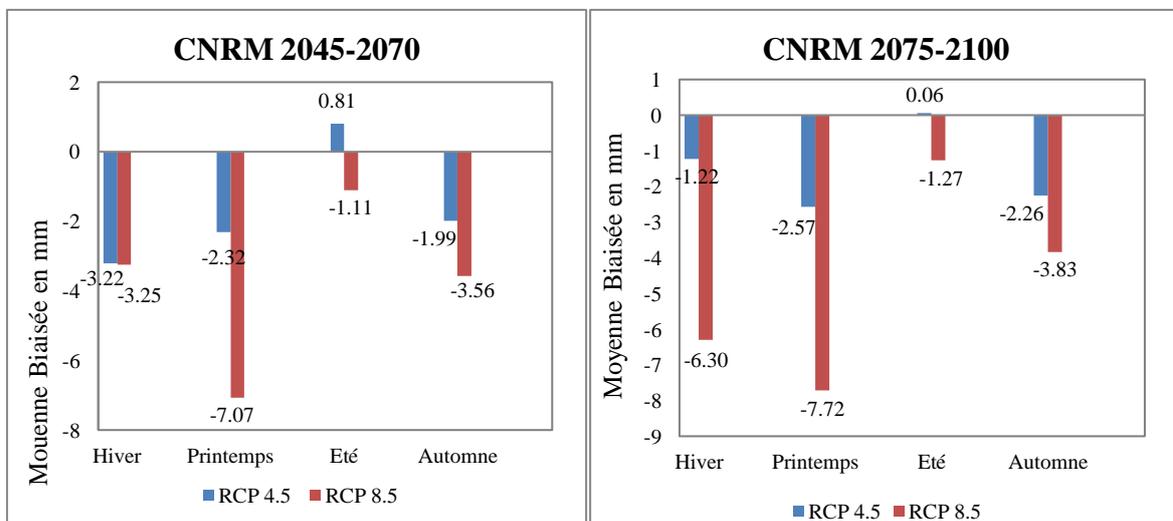


Figure 4-26 : Simulations des écoulements futurs à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM

Cependant, l'absence de correction des biais pour les projections futures pourrait conduire à des erreurs dans les études d'impact et ce dans les stratégies à adapter. Cette correction est généralement uni-variée et corrige chaque variable d'intérêt indépendamment des autres (Chen et al., 2017).

Kotlarski et al., (2014), mentionnent que les biais de précipitations sont généralement de l'ordre de -40% et + 80% dans le bassin méditerranéen dans le cadre du projet Cordex, et que les biais de température moyenne régionale sont généralement inférieurs à 1,5°C, nécessitant de ce fait une correction des biais.

A cet effet, nous avons effectué une correction du biais pour les précipitations et les températures afin d'améliorer les simulations futures à l'échelle de notre zone d'étude.

4.5. Correction de biais des sorties des modèles

L'analyse de la variabilité passée et future des précipitations et des températures des deux modèles climatiques MPI et CNRM ont montré des biais importants en particulier entre les pluies observées et simulées entre la période 1981-2005, ce qui risque d'affecter les simulations futures. De ce fait, une correction du biais sera appliquée afin d'affiner les simulations de ces deux modèles climatiques.

Ces méthodes de corrections permettent de corriger les résultats des projections futures sur la base d'une comparaison au cours de la période de contrôle (1981-2005) entre les données observées d'une part et celles simulées d'autre part. L'écart entre les deux est considéré comme l'erreur du modèle.

La méthode de basic-quantile est la plus simple des méthodes de correction de biais. Elle corrige les données simulées futures en utilisant la différence de moyenne entre une simulation de climat passée et les observations sur une même période de référence.

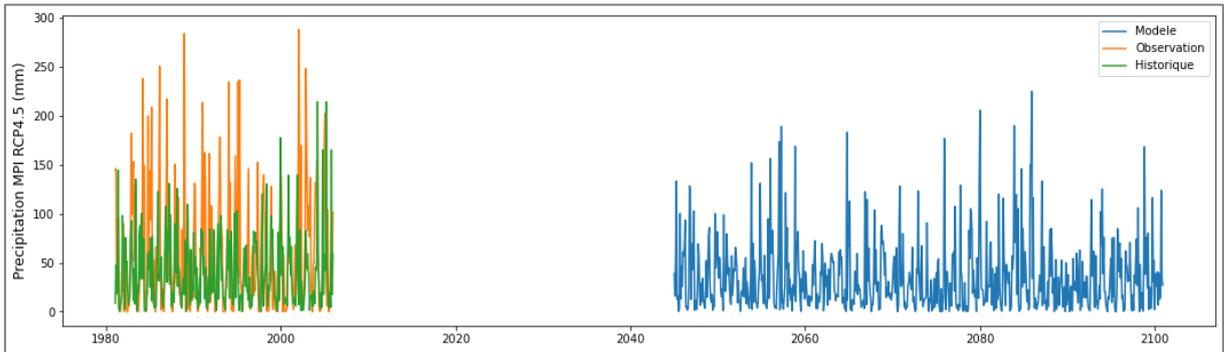
En général, la méthode gamma-mapping consiste à élaborer une fonction de correction mathématique pour ramener la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées.

Après la correction des biais, le changement futur est estimé entre les données simulées et les données observées.

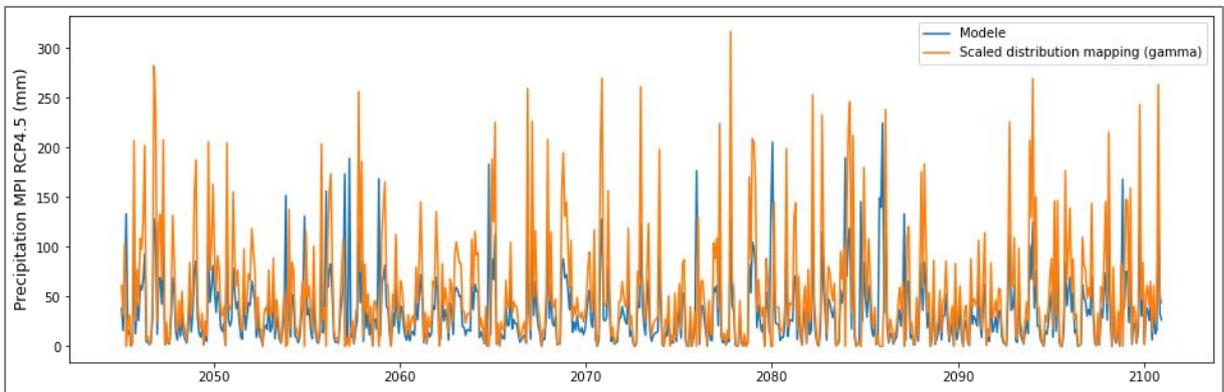
4.5.1. Correction des biais appliquée aux précipitations

Les simulations des précipitations sont corrigées à l'aide des méthodes de correction de biais « basic-quantile » et « gamma-mapping ».

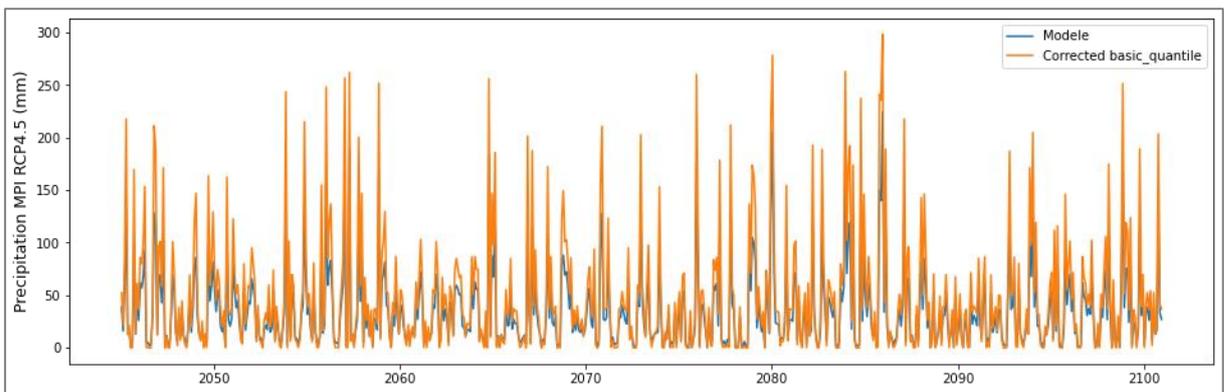
D'après la correction des biais effectuée pour les précipitations par les deux méthodes de correction, les résultats de chaque modèle climatique montrent à l'échelle annuelle que la différence entre les pluies observées et pluies simulées corrigées n'est pas très grande pour les deux scénarios d'émission. La figure 4-27 représente les résultats la cas de correction du biais du modèle MPI pour RCP4.5.



Différence entre les pluies simulées et observées



Simulations futures après correction du biais par la méthode gamma-mapping



Simulations futures après correction du biais par la méthode basic-quantile

Figure 4-27 : Cas de correction du biais du modèle MPI pour RCP4.5

A l’échelle saisonnière et d’ici la fin du 21 siècle, les simulations corrigées des précipitations du modèle CNRM durant l’hiver montrent que la méthode gamma-quantile est moins biaisée pour les deux scénarios d’émission. Le RCP 4.5 simule une diminution considérable des précipitations en hiver à l’horizon 2070 (figure 4-28). Selon les deux périodes de projections, le scénario pessimiste RCP8.5 simule une diminution des précipitations encore plus importante en hiver qui continue jusqu’au printemps (figure 4-29). Toutefois, le biais élevé en période sèche s’explique par une faible quantité de pluie en cette saison. Les diminutions de pluie indiquées par les projections peuvent affecter négativement sur les écoulements des eaux au niveau de la partie amont du bassin versant de l’Oued El Harrach.

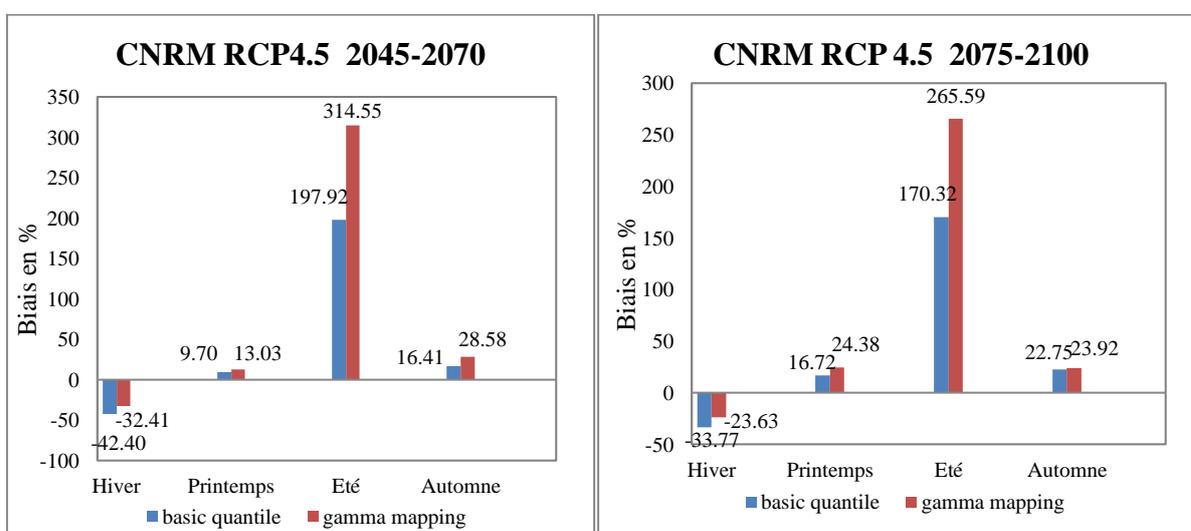


Figure 4-28 : Comparaison des simulations futures du modèle CNRM RCP4.5 après la correction par rapport aux observations

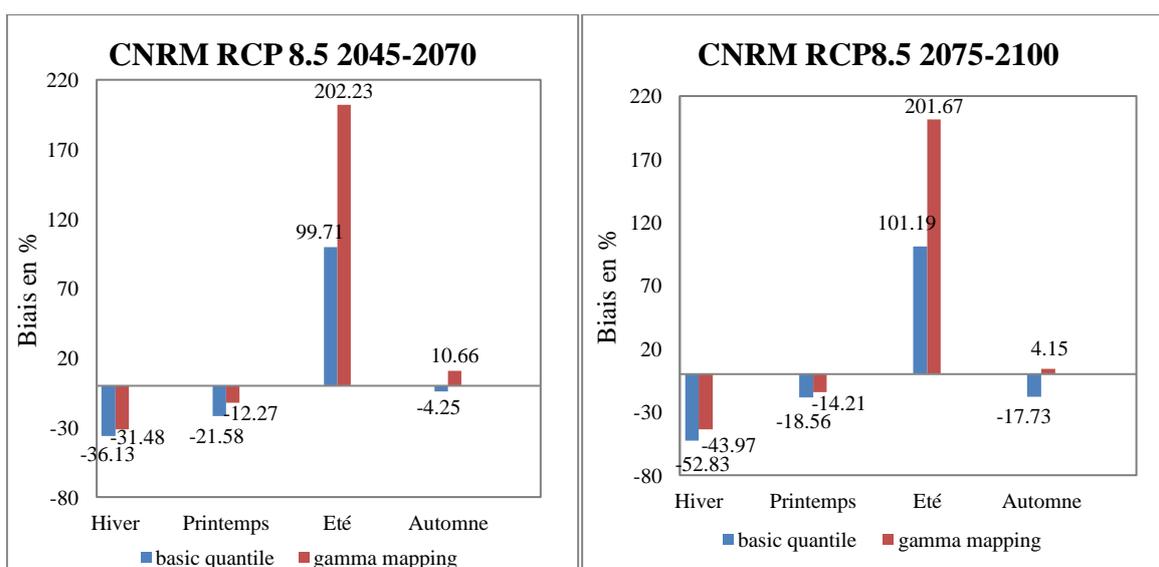


Figure 4-29 : Comparaison des simulations futures du modèle CNRM RCP8.5 après la correction par rapport aux observations

Le modèle MPI simule une diminution des précipitations en période humide moins importante que celle simulée par le CNRM.

Suivant les projections corrigées des précipitations, le MPI simule selon le RCP 4.5 des réductions pluviométriques qui marquent les saisons de l'hiver et du printemps et qui sont un peu plus sévères selon le RCP 8.5 (figure 4-30 et Figure 4-31).

Dans l'ensemble en ce qui concerne les corrections de la pluviométrie, la méthode « gamma quantile » reste la moins biaisée que celle du « basic quantile ».

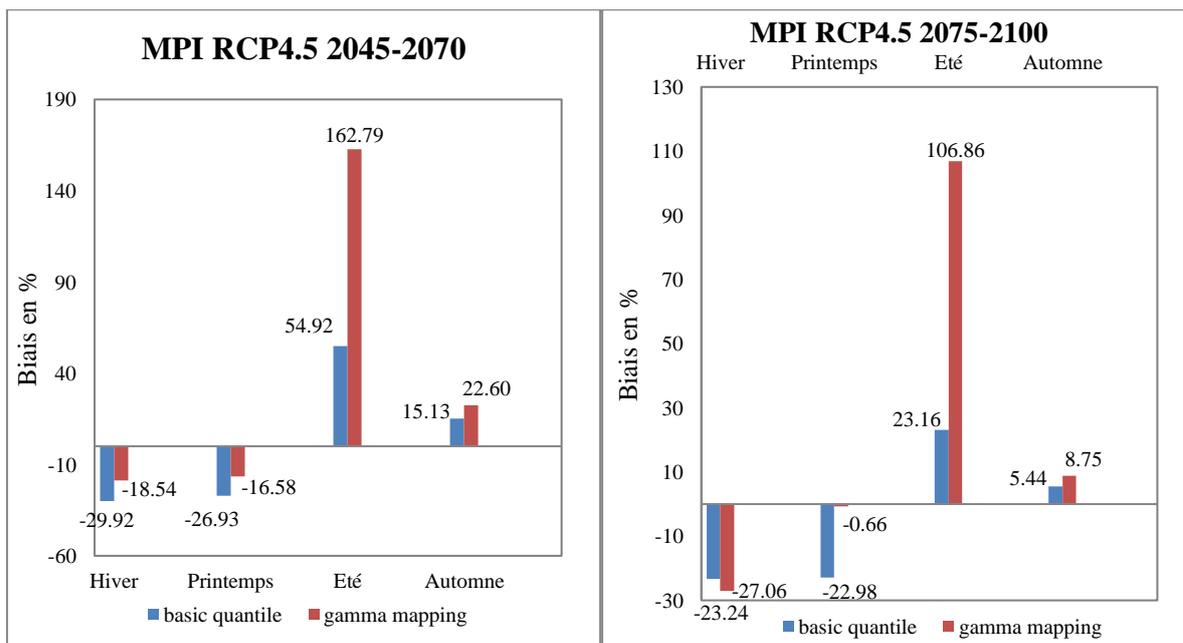


Figure 4-30 : Comparaison des simulations futures du modèle MPI RCP4.5 après la correction par rapport aux observations

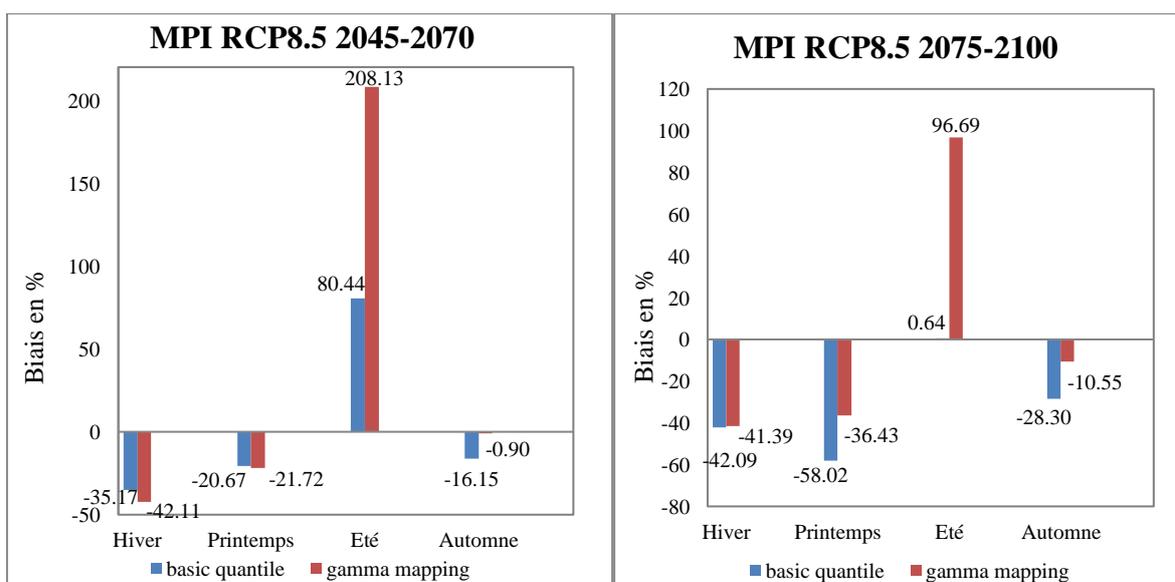


Figure 4-31 : Comparaison des simulations futures du modèle MPI RCP8.5 après la correction par rapport aux observations

4.5.2. Correction des biais pour les températures

Dans cette partie les simulations des températures seront corrigées par une seule méthode de correction « basic-quantile ».

A l'échelle annuelle et après la correction des biais des températures par la méthode de correction « basic-quantile », les résultats de chaque modèle climatique montrent une augmentation des températures pour les deux scénarios d'émission d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Toutefois, les corrections effectuées sur le modèle CNRM sont les moins biaisées que celles du MPI (figure 4-32 et Figure 4-33).

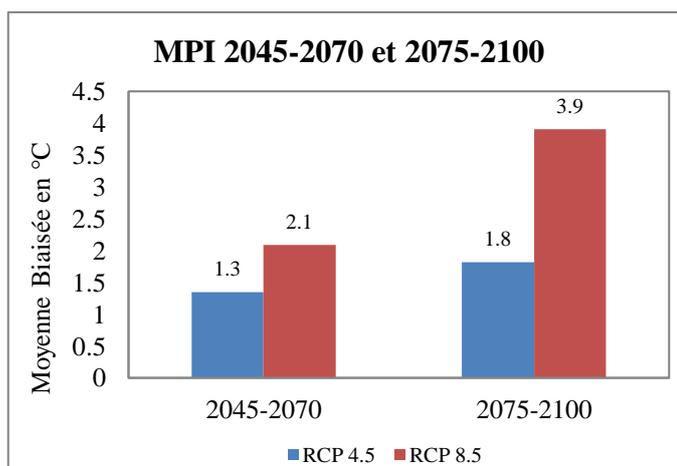


Figure 4-32 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle annuelle par le modèle MPI

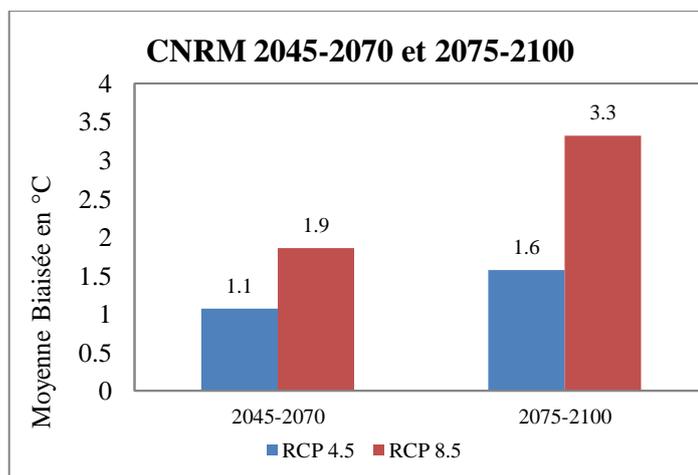


Figure 4-33 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle annuelle par le modèle CNRM

A l'échelle saisonnière et d'après les deux figures 4-34 et 4-35, les simulations corrigées des températures d'ici la fin du 21^{ème} siècle montrent que le CNRM est le moins biaisé que celui du

MPI durant toutes les saisons de l'année pour les deux scénarios d'émission. Les moyennes biaisées corrigées du CNRM varient entre 0,6°C et 3,9°C.

Selon les deux périodes de prédiction, les deux modèles climatiques CNRM et MPI simule une augmentation des températures durant toute l'année. Le modèle CNRM simule des élévations des températures moins importantes que celles simulées par le MPI. Ces hausses de température peuvent affecter négativement sur les écoulements des basses et des hautes eaux du bassin versant étudié.

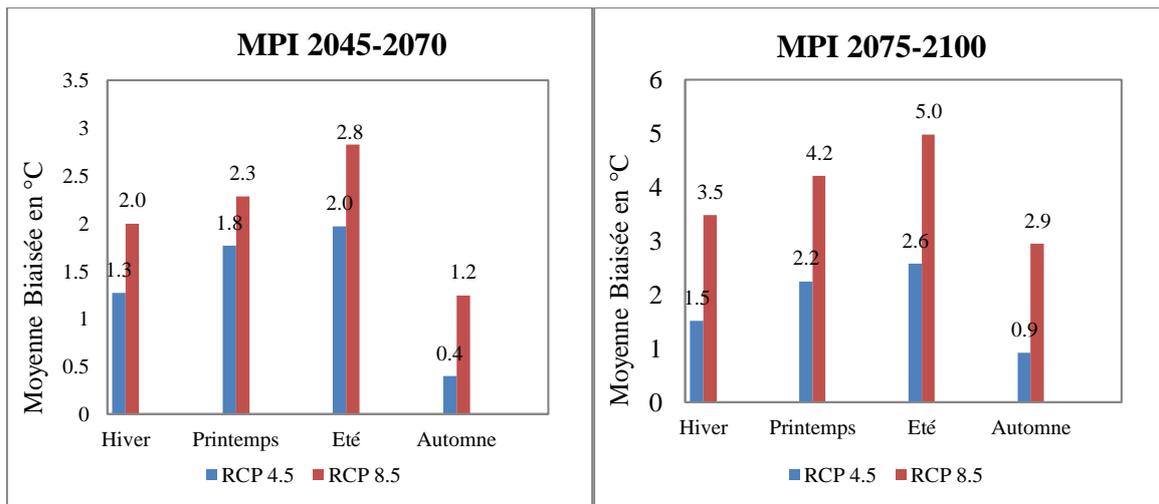


Figure 4-34 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle MPI

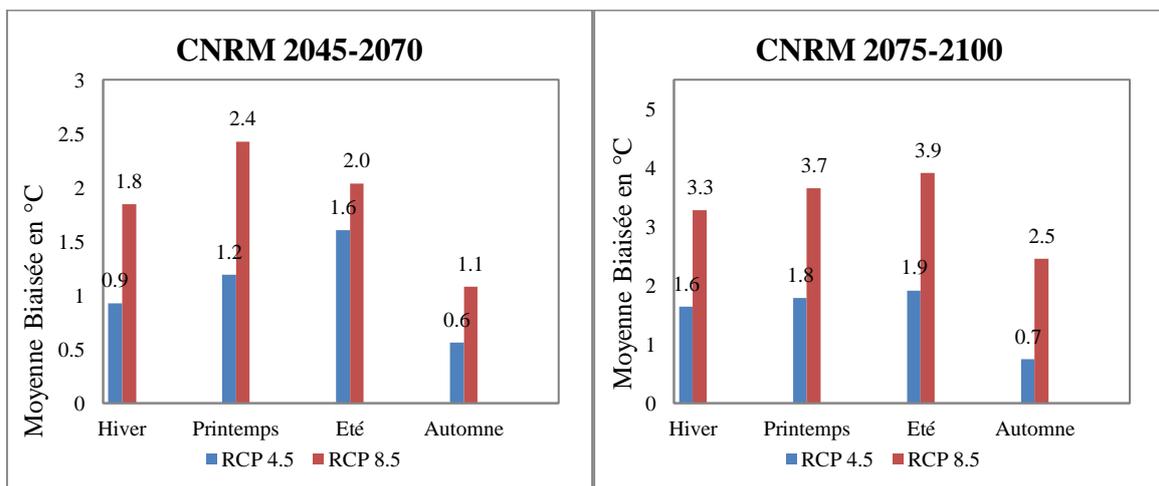


Figure 4-35 : Simulations des températures futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM

4.5.3. Correction des biais pour les ETP

Après la correction des biais par la méthode basic-quantile des températures futures, les ETP ont été calculées de nouveau moyennant ces températures corrigées en appliquant la formule de

Thornthwaite.

L'échelle saisonnière, le modèle MPI simule des augmentations des ETP durant le printemps et l'été et sont un peu moins légères pendant l'hiver. L'augmentation maximale a été prédise pour le RCP8.5 en période sèche avec 15,25% à l'horizon 2070 et 27,69% à l'horizon 2100 figure (4-36).

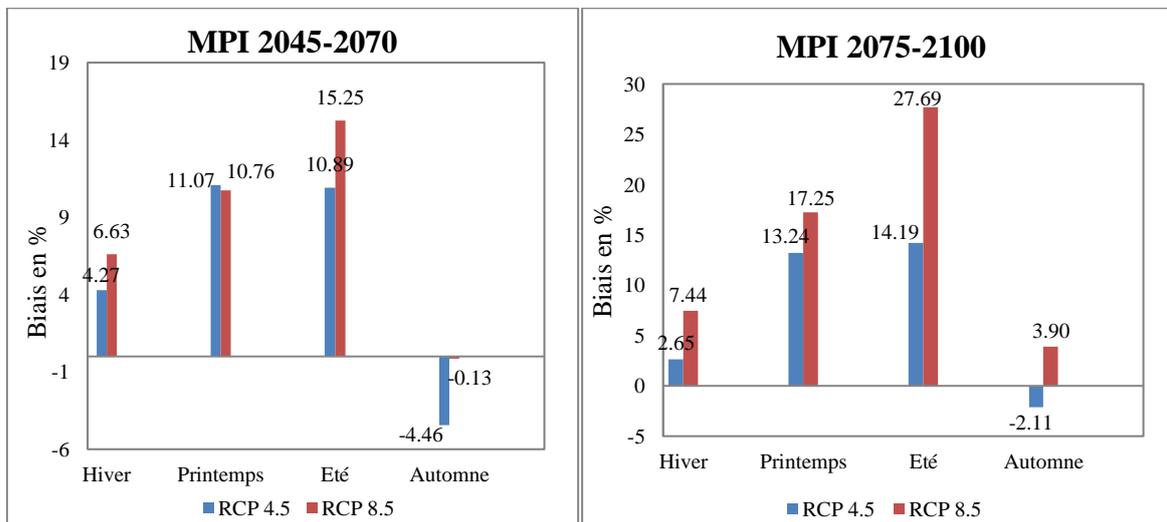


Figure 4-36 : Simulations des ETP futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle MPI

Le CNRM prédit par le scénario pessimiste RCP4.5, une augmentation des ETP plus accentuée qui attendra en Printemps 13,42% à l'horizon 2070 et en Eté 20,18% à l'horizon 2100 (figure 4-37).

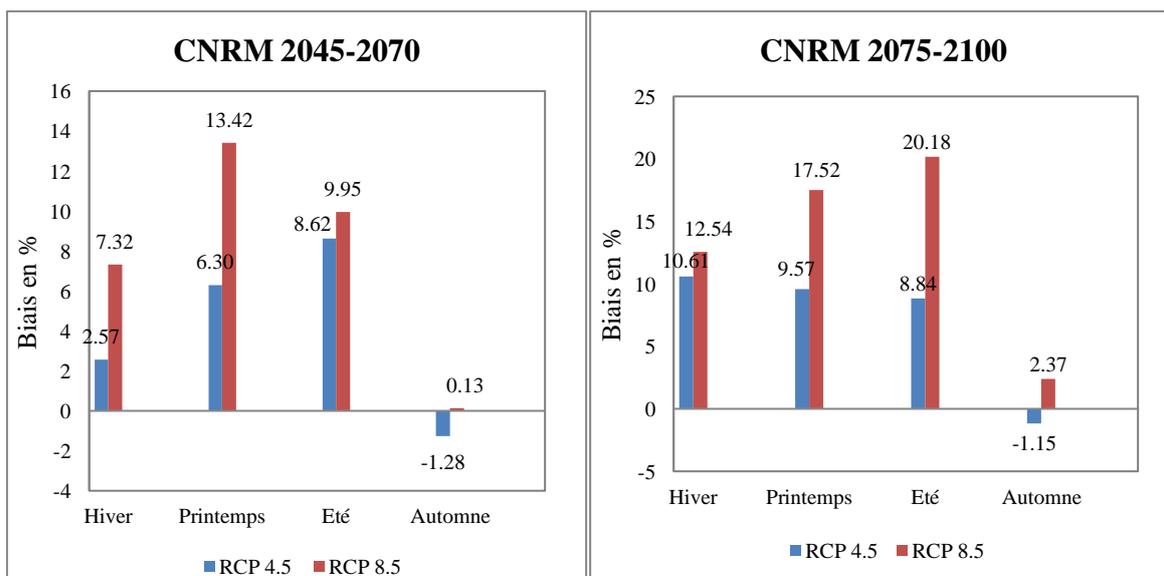


Figure 4-37 : Simulations des ETP futures après correction à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM

Dans l'ensemble, le modèle CNRM prévoit des augmentations des ETP moins que celles qui ont simulées par le MPI.

On remarque que les ETP futures des deux modèles climatiques calculés après la correction des biais sur températures ont légèrement diminués par rapport à ceux calculés sans aucune correction.

4.5.4. Correction des biais pour les écoulements

La correction des biais étant faite, nous allons procéder à l'étude de l'évolution future des écoulements pour les périodes de projection au titre du futur proche d'abord et ensuite pour le futur lointain. Le modèle hydrologique GR2M validé initialement pour les paramètres $X1=179,08$ et $X2=0,79$ permet de faire ressortir les écoulements simulés corrigés de chaque scénario (RCP4.5 et RCP8.5). Ce modèle repose sur l'utilisation des données d'entrée « les pluies simulées corrigées » et les « ETP simulés calculés après la correction des températures ».

Il importe de souligner que la correction des biais a été effectuée sur les précipitations par les méthodes de correction « basic-quantile (B-Q) » et « gamma-mapping (G-M) » et sur les températures par la méthode « basic-quantile (B-Q) ».

A l'échelle annuelle, les deux modèles climatiques MPI et CNRM montrent une tendance à la baisse des écoulements annuels pour les deux périodes de projections étudiées qui varie entre 0,90 mm (4,84%) et 12,25 mm (65,85%) (Figure 4-38 et figure 3-39).

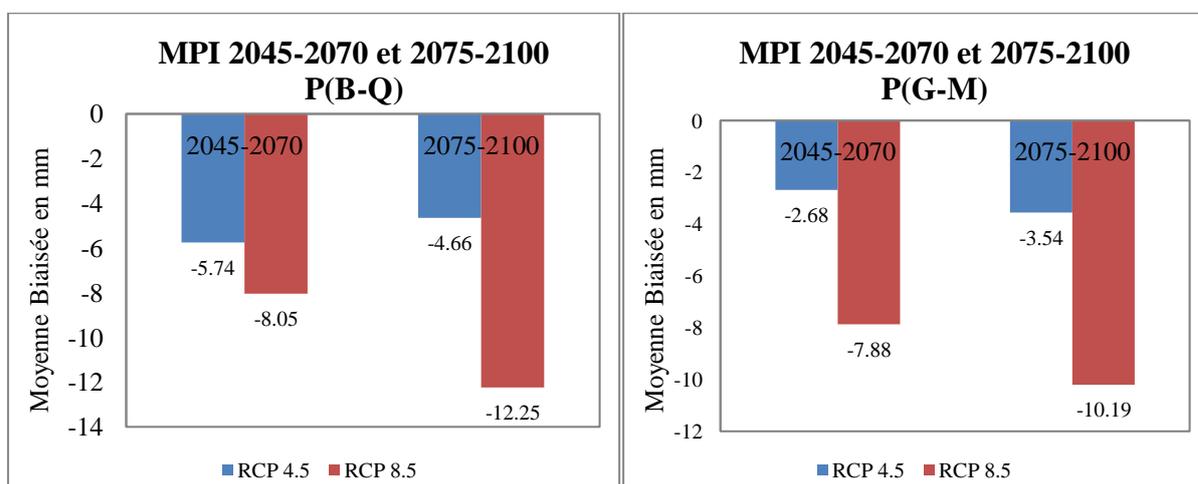


Figure 4-38 : Simulations des écoulements futurs après correction à l'échelle annuelle par le modèle MPI

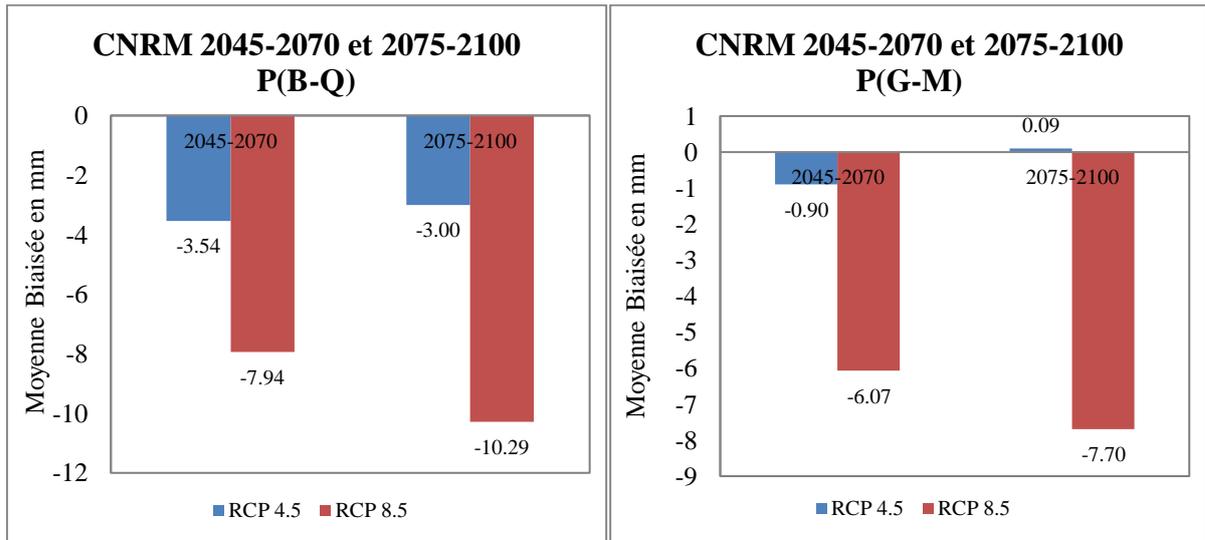


Figure 4-39 : Simulations des écoulements futurs après correction à l'échelle annuelle par le modèle CNRM

A l'échelle saisonnière et après les corrections des biais effectuées sur les pluies par les deux méthodes de correction, le MPI simule pour le RCP4.5, une diminution de l'écoulement pendant les l'Hiver, le Printemps et l'Eté pour les deux périodes de projections étudiées. La baisse de la lame d'eau écoulee atteint un niveau maximal en Hiver avec une hauteur moyenne d'environ 13mm soit environ 30,26% (figure 4-40).

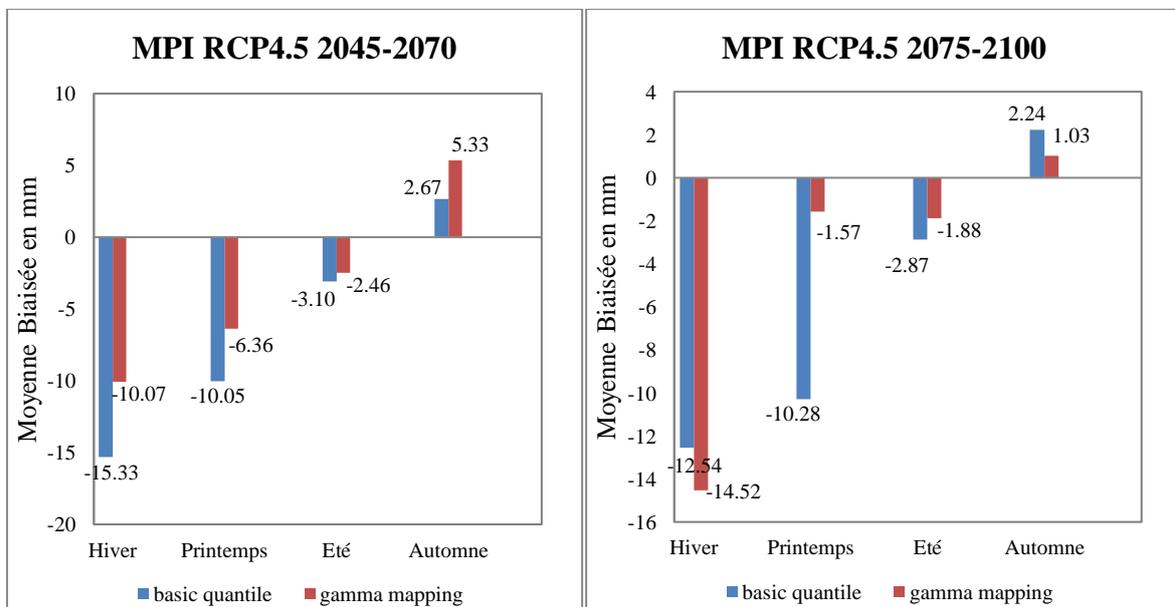


Figure 4-40 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI-RCP4.5

Selon le RCP8.5, une tendance à la baisse des écoulements est simulée durant toutes les saisons de l'année. La période de l'hiver montre une diminution plus importante de la lame d'eau écoulée avec une hauteur moyenne d'environ 22mm soit environ 58,51% (figure 4-41).

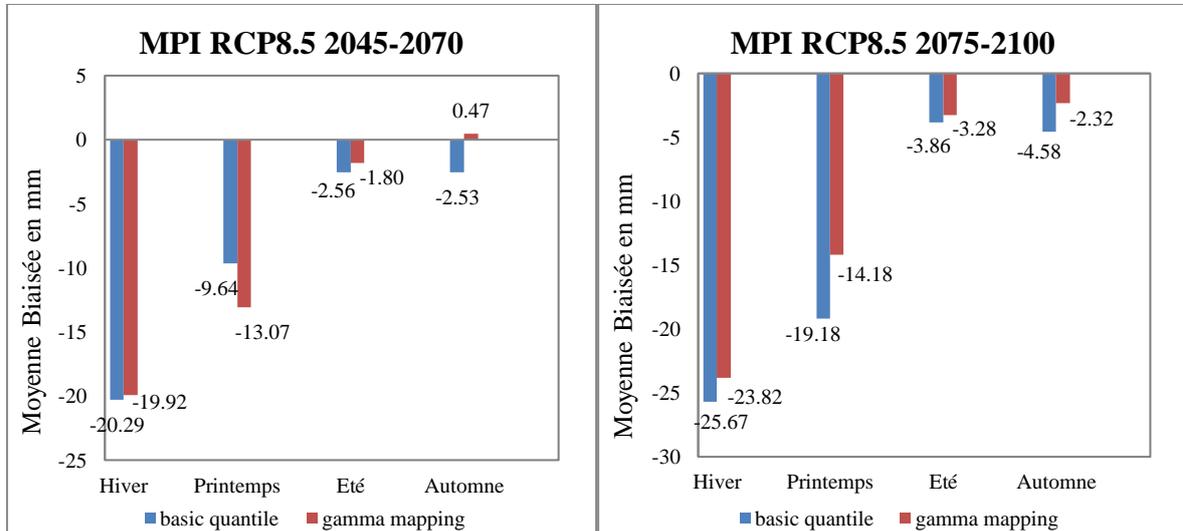


Figure 4-41 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI –RCP8.5

Après avoir corrigé les biais sur les précipitations par les deux méthodes de correction, le CNRM montre selon le RCP4.5 une diminution de la lame d'eau écoulée seulement pendant l'Hiver avec une hauteur moyenne d'environ 14mm soit d'environ 36,55%. Les biais positifs constatés durant les périodes du Printemps, Eté et Automne s'expliquent par une faible quantité des écoulements dans le cours d'eau en ces périodes.

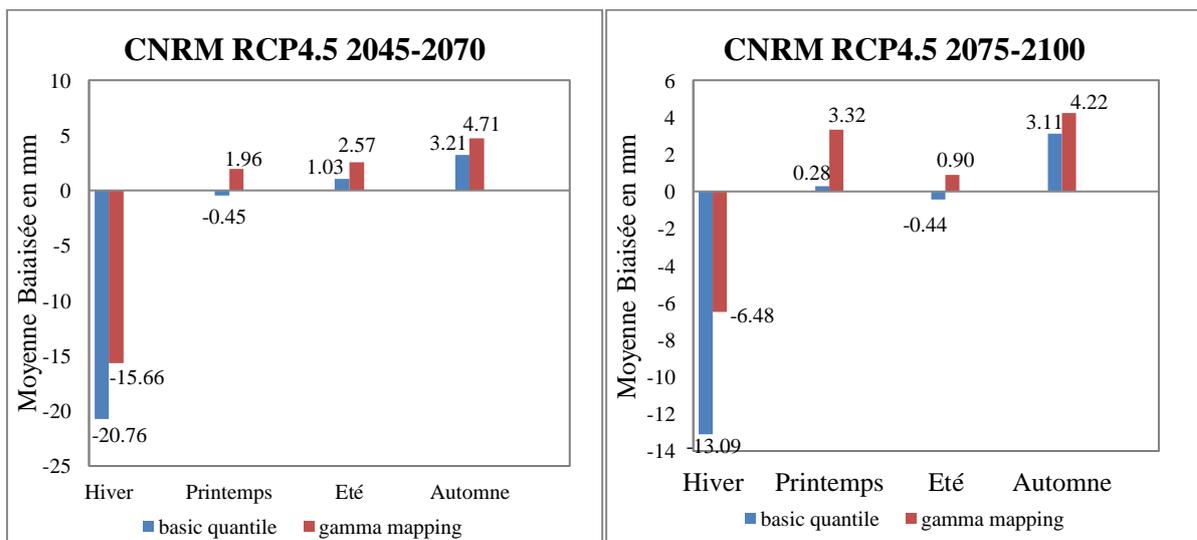


Figure 4-42 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM –RCP4.5

Le scénario pessimiste du CNRM montre des baisses de la lame d'eau écoulee durant toutes les saisons. Cette diminution atteindra une hauteur moyenne d'environ 11mm (39,16%) en printemps et 23mm (60,51%) en Hiver (figure 4-43).

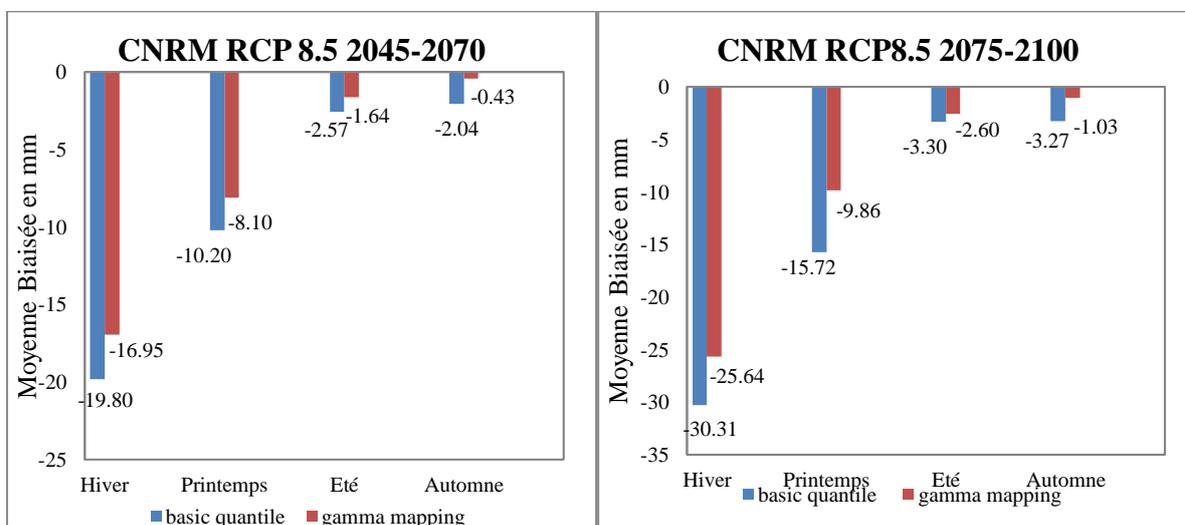


Figure 4-43 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs après les corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM –RCP8.5

4.6. Comparaison des résultats

D'après la comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle annuelle des deux modèles climatiques régionaux, les résultats montrent que la méthode de correction de biais « Gamma-mapping » est la moins biaisée. Les résultats indiquent une baisse respectivement de 4,84% selon le RCP4.5 (future proche) et de 32,66% selon le RCP8.5 (future lointain).

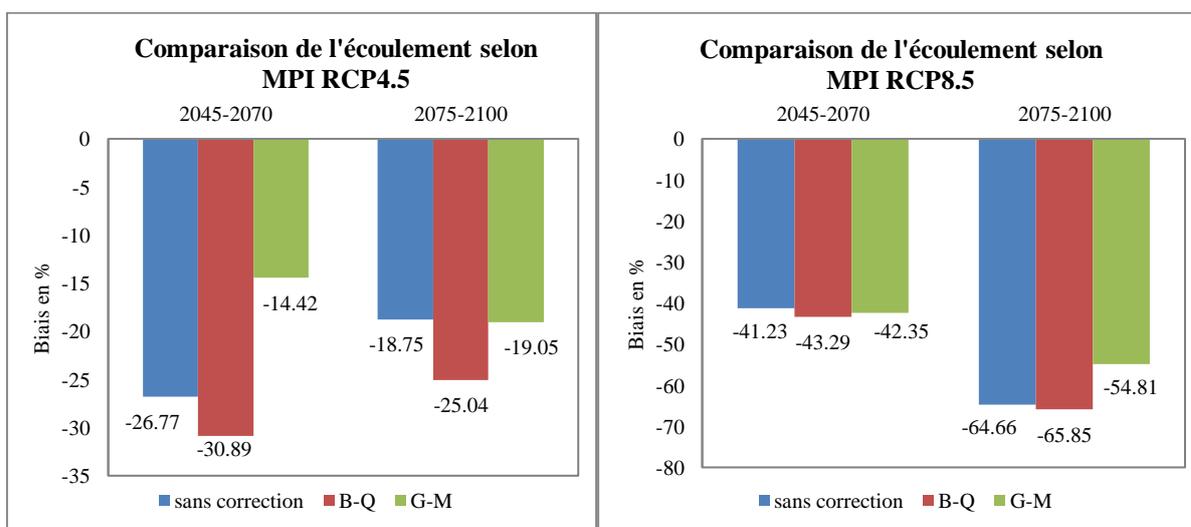


Figure 4-44 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle annuelle par le modèle MPI

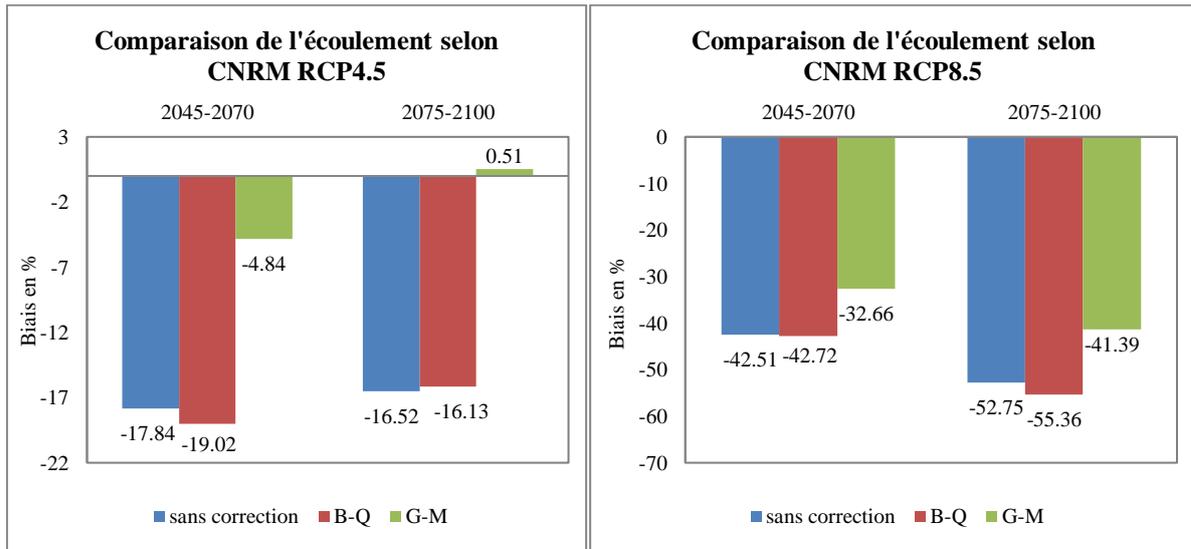


Figure 4-45 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle annuelle par le modèle CNRM

Selon le MPI et à l'échelle saisonnière, les résultats après la correction avec la méthode « gamma quantile » montrent une tendance à la baisse des écoulements durant la période humide pour les deux périodes de prédictions (Figures 4-46 et 4-47).

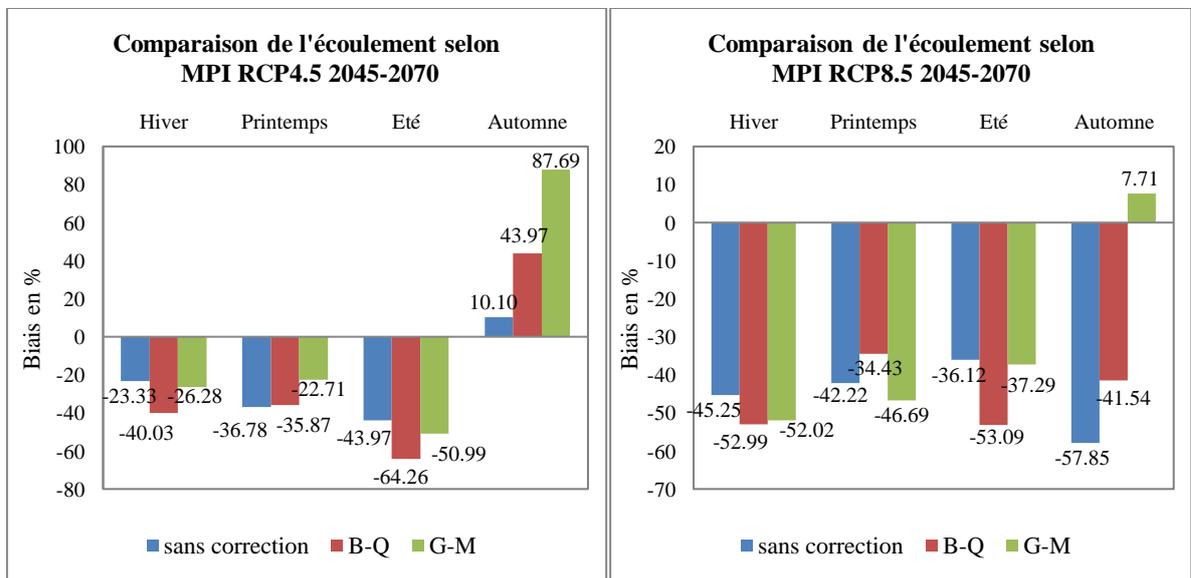


Figure 4-46 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI à l'horizon 2045-2070

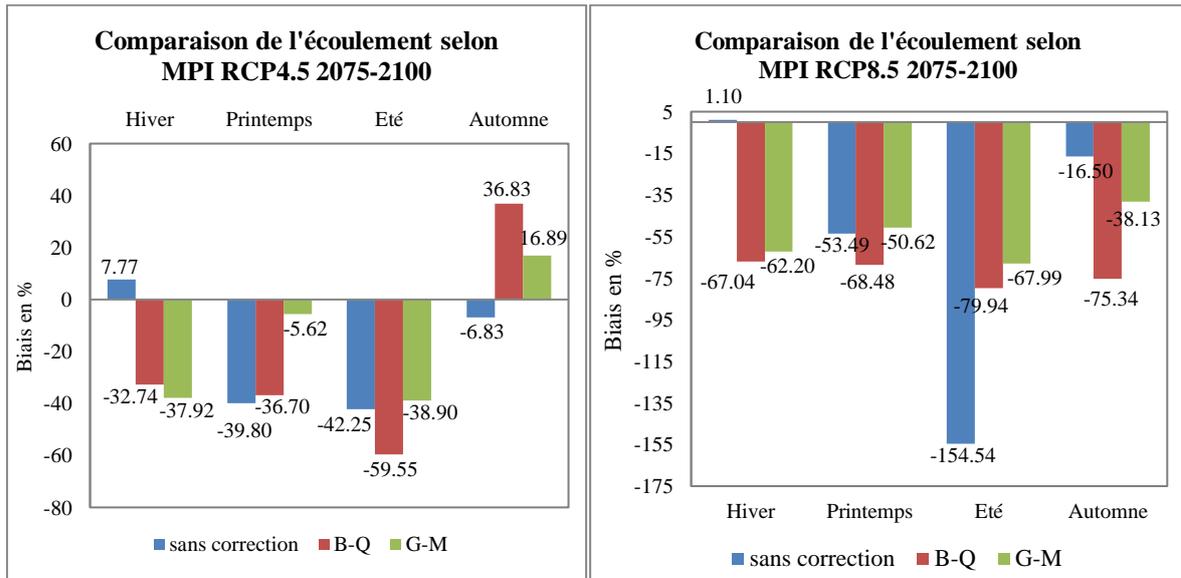


Figure 4-47 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle MPI à l'horizon 2075-2100

Egalement le CNRM prévoit après la correction avec la méthode « gamma quantile » des diminutions de la lame écoulée durant la période humide pour les deux périodes de prédictions (Figures 4-48 et 4-49).

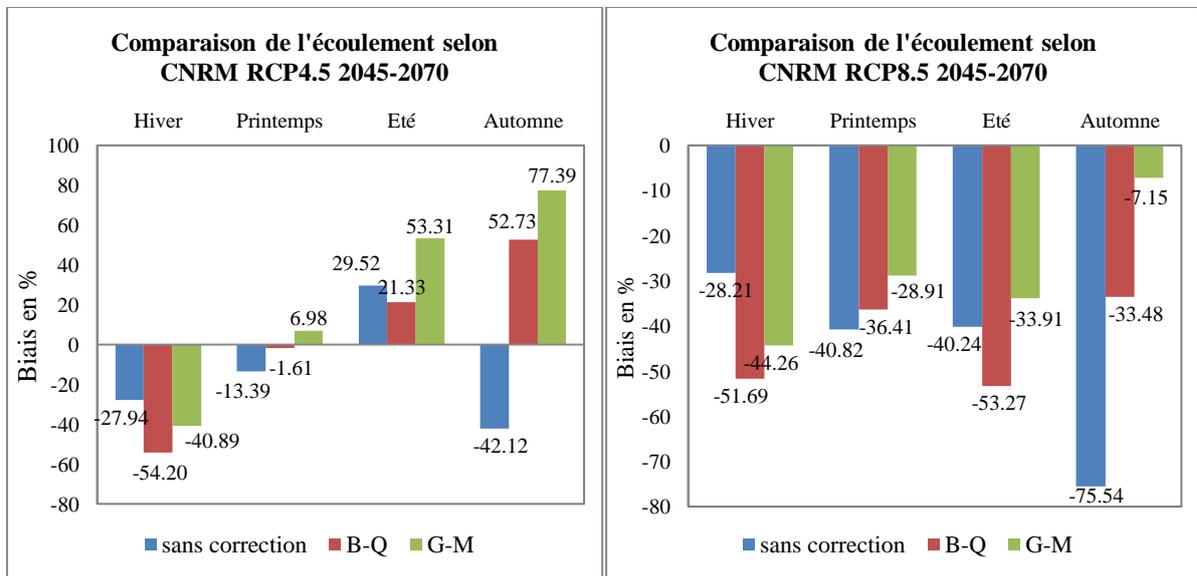


Figure 4-48 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM à l'horizon 2045-2070

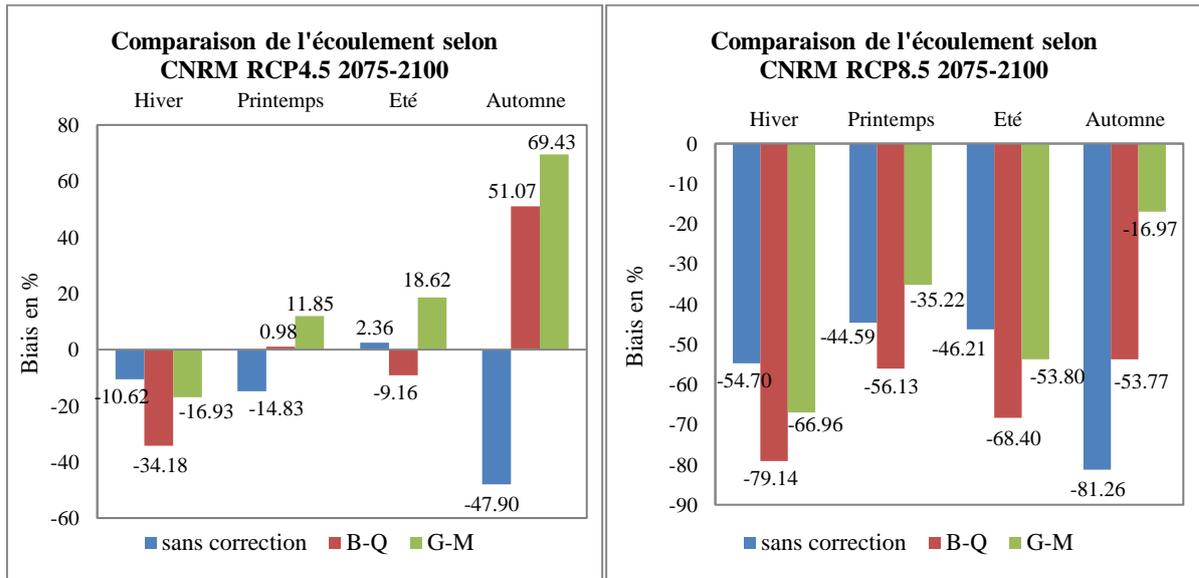


Figure 4-49 : Comparaison entre les simulations des écoulements futurs avec et sans corrections à l'échelle saisonnière par le modèle CNRM à l'horizon 2075-2100

Dans l'ensemble des résultats, la méthode gamma-mapping reste la moins biaisée des projections des modèles climatiques régionaux.

Conclusion :

L'ensemble des résultats obtenus montrent que l'écoulement futur de notre zone d'étude sera affecté par les changements climatiques en raison de l'augmentation de la température, et du coup de l'évapotranspiration ainsi que la diminution des précipitations causant une répartition très irrégulière de ces dernières.

Conclusion générale

Le changement climatique constitue aujourd'hui une préoccupation mondiale, impliquant à long terme des interactions complexes entre facteurs environnementaux et conditions économiques, politiques, sociales et technologiques.

Dans ce contexte, la question d'ordre scientifique fondamentale est de prévoir, dans le cadre d'un bassin versant donné : Comment évaluer l'impact du changement climatique pour pouvoir procéder aux planifications (moyens et mesures d'adaptations et d'atténuation) ?

Ainsi, le présent mémoire a eu pour objectif d'étudier les écoulements au niveau du bassin de l'Oued El Harrach Amont au Nord de l'Algérie sous l'effet des changements climatiques sous trois périodes, la première étant un historique qui va de l'année 1981 jusqu'à 2005 puis la seconde représente un future proche allant de 2045 jusqu'à 2070 et la dernière qui est le futur lointain de 2075 jusqu'à 2100.

Pour se faire, le modèle hydrologique GR2M a été calibré au cours de la période (1981-1991) puis validé sur la période (2003-2013) au titre du bassin versant étudié. En effet, les résultats ont montré que les performances du modèle à reproduire le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant sont satisfaisantes avec un critère de Nash supérieur à 70%.

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le bassin versant est basée sur l'analyse des simulations climatiques (précipitations, températures, ETP et écoulements) issues de deux modèles climatiques régionaux du projet Cordex-Africa (MPI et CNRM) d'ici la fin du 21^{ème} siècle sous deux scénarios d'émission (RCP4.5 et RCP 8.5) par rapport à la période de contrôle (1981-2005).

Ainsi afin d'améliorer ces simulations, deux méthodes de correction de biais ont été utilisées à savoir : « basic-quantile » et « gamma mapping ». Les résultats ont montré une réduction des pluies de 32,41% accompagnée d'une augmentation de température de 1°C selon le scénario optimiste à l'horizon 2070. De même, le scénario pessimiste a indiqué d'ici la fin du 21^{ème} siècle, une baisse de la pluviométrie de 43,97% avec une élévation des températures de 3,3°C. Ces changements climatiques génèrent une baisse des ressources en eau durant la période humide sachant qu'en hiver, le RCP8.5 prévoit que cette diminution sera respectivement de 44,26% à l'horizon 2070 et de 66,96% à l'horizon 2100. Ces résultats restent subordonnés à un certain nombre d'incertitudes à savoir l'incertitude liée à la qualité des données utilisées mais aussi celle de la modélisation liée à la paramétrisation et à la régionalisation des modèles climatiques.

Les conclusions de cette étude méritent d'être consolidées d'avantage par l'utilisation d'autres modèles climatiques et méthodes de correction de biais pour obtenir des résultats complémentaires pertinents.

Soulignons que dans la région de Hammam Melouane, un Barrage prise dit « Barrage de Tabainet » a été conçu et réalisé par l'ANBT afin de transférer nominalement $71 \text{Hm}^3/\text{an}$ des eaux de l'oued El Harrach Amont vers le barrage « Douera » dont $21,5 \text{Hm}^3/\text{an}$ sont destinées à alimenter en eau potable une partie de la wilaya de Blida et ses environs. Les autres eaux sont destinées à l'irrigation d'une surface de $12\,000 \text{Ha}$ (dont $7\,000 \text{Ha}$ est actuellement équipée) de la plaine de la Mitidja centre et la réalimentation de la nappe de la Mitidja par infiltration (ANBT et DRE).

Toutefois, l'augmentation de la population, l'évolution des besoins en eau de l'irrigation de la plaine de Mitidja centre ainsi que la surexploitation de la nappe souterraine accompagnée par une baisse des ressources en eau au sein du bassin versant sous l'effet des changements climatiques va engendrer une contrainte pour subvenir à tous ces besoins.

Compte tenu des résultats de cette étude, une stratégie doit être construite à l'effet de mettre en place une planification à moyen et à long terme de la gestion des ressources en eau pour faire face à l'impact des changements climatiques futurs. Cette stratégie doit reposer sur la maîtrise des conditions d'exploitation de l'eau dans l'optique de la rationalisation et par suite de l'économie substantielle de la ressource, et sa pérennité.

Bibliographie

- ADB, 2018. African development bank en collaboration avec African climate & development initiative, university of cape town; Climate systems analysis group, university of cape town et Energy research Centre, university of cape town; cirrus group (2018). Algérie : Profil National de Changement Climatiques, pp 1-26.
- Achour, K; Meddi, M; Zeroual, A; Bouabdelli, S; Maccioni, P; and Moramarco, T. ,2020. Analyse spatio-temporelle et prévision de la sécheresse dans les plaines du nord-ouest de l'Algérie à l'aide de l'indice de précipitation standardisé, J. Earth Syst. Sci., 129, 42 (2020).
- Anza, H.F.Z ,2019. Impact des changements climatiques sur les écoulements du barrage de Ain Daila Wilaya de Souka Ahras. Mémoire de Master en Hydraulique à l'université de Blida.
- Bekhira, A ; Habi, M et Morsli, B ,2018. Hydrological modeling of floods in the Wadi Bechar watershed and evaluation of the climate impact in arid zones (southwest of Algeria). Applied Water Science. Vol. 8. Iss. 6 p. 1–8.
- Benyettou, M.A et Bouklikha, A. 2017. Variations et tendances des températures et des précipitations journalières en Algérie. Mémoire de Master en Hydraulique à l'université de Tlemcen.
- Bernardara, P., 2007. Hydraulique et hydrologie. Support de cours d'Hydrologie. Master ESTP, Cemagref de Lyon, France.
- Bouabdelli, S; Meddi, M; Zeroual, A et Alkama, R ,2020. Hydrological drought risk recurrence under climate change in the karst area of Northwestern Algeria, J. Water Clim. Change (2020) 11 (S1): 164–188.
- Boucherf, D. ,2010. Étude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie. Thèse de magister à l'université de Houari-Boumediène, Algérie, 144 p.
- Boulariah, O ; Meddi,M et Longobardi,A , 2019. Assessment of prediction performances of stochastic and conceptual hydrological models: monthly stream flow prediction in northwestern Algeria.
- Chen, J ; Li, C ; Brissette, F-P ; Che, H ; Wang, M ; Essou, G-RC, 2017. Correction de biais des sorties de mode les climatiques: doit-on tenir compte des corrélations inter-variable ?
- Djelloul, F ,2014. Contribution à l'étude de la relation "pluie- débit" : cas de quelques sous bassin du côtier algérois. Mémoire de Master en Hydraulique à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique à Blida.
- El Watan.com, 2020 : Réchauffement climatique : Les neuf conséquences alarmantes : Zeineddine Nouaceur, climatologue, énumère les conséquences du changement climatique. Il existe au moins neuf retombées les plus alarmantes publié le 24 Décembre 2020 sur : <https://www.elwatan.com/pages-hebdo/magazine/rechauffement-climatique-les-neuf-consequences-alarmantes-24-12-2020#:~:text=On%20a%20assist%C3%A9%20depuis%20les,courte%20BB%2C%20explique%20Zeineddine%20Nouaceur.&text=%C2%ABEn%202018%20et%202019%2C%20les,la%20partie%20est%20du%20pays.>
- Fabre, J et al. Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse: Bilan des connaissances. L'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse. 2012.
- GIEC, 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques, Rapport de synthèse, n.3, 97p
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse n.4, 114p
- GIEC, 2013-2014. Bilan 2013 des changements climatiques. Rapport de synthèse n.5, 27p.
- GIEC, 2019. SROCC : Le rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du

changement climatique, publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

- Hadour, A ; Mahé, G; Meddi, M ,2020. Impact des changements climatiques sur la ressource en eau dans trois grands bassins versants du Centre et de l'Ouest de l'Algérie. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 28 (2020) 13p.
- Hallouz, F; Karahacane, H; Meddi, M; Fisjak, Y; Sadi, F;
- Hassini, N ; Abderrahmani, B et Dobbi, A ; 2009. Tendances des précipitations et de la sécheresse sur le littoral Algérien : impact sur les réserves hydriques, pp 1-11
- Jones C., F. Giorgi et G. Asrar, 2011 The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX An international downscaling link to CMIP5. *CLIVAR Exchanges* n° 56, vol. 16, 34-40
- Kabouya, M. et Michel, C., 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau* 4(4), 569-587.
- Kabouya, M., 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347p.
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.* 7, 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>.
- Le Clerc, S., 2004. Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation des inondations. Thèse de doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Madani, A .Z et Mahtout, S ,2020. Evaluation des techniques de correction du biais de précipitations sur l'amélioration de la simulation hydrologique : cas du bassin versant de la Chiffa. Mémoire de Master en Hydraulique à l'université de Blida.
- Makhlouf, Z. et Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.
- Makhlouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426p.
- Mami, A., 2020. Impact des changements climatiques sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau : cas du bassin versant de la Tafna. Thèse de Doctorat, université de Toulouse.
- Matari, A et Douguedroit, A ,1995. Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l'ouest Algérien. Les stratégies pour le contrôle des sécheresses. 9e conférence régionale afro-asiatique des irrigations et du drainage, 5-6 juin 1995, Alger, Algérie, Compte rendu, pp. 166-278.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463p.
- Meddi, M ; Assani, AA et Meddi, H. ,2010. Variabilité temporelle des précipitations annuelles dans les bassins versants de Macta et Tafna, nord-ouest de l'Algérie, *Water Resour. Manage.*, 24, 3817–3833(2010).
- MedECC, 2018. Mediterranean Experts on Climate and environmental Change : une évaluation préliminaire : Les risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans la région méditerranéenne.
- MedECC, 2019. Mediterranean Experts on Climate and environmental Change: 1er rapport d'évaluation scientifique sur le changement climatique et environnemental en

Méditerranée.

- Michel, C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref (Antony), France, 323 p.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 2013. 2001-2010, une décennie d'extrêmes climatiques. Communiqué de presse No 976. <https://public.wmo.int/fr/medias/nouvelles/2001-2010-une-decennie-dextr%C3%A9mes-climatiques>.
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 2019. État du climat mondial 2015-2019: le changement climatique s'accélère. Publié le 22 septembre sur internet : <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/%C3%A9tat-du-climat-mondial-2015-2019-le-changement-climatique-s%E2%80%99acc%C3%A9l%C3%A8re>
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 2020. L'OMM confirme que 2019 se classe au deuxième rang des années les plus chaudes jamais observées. Communiqué de presse du 01/15/2020 publié sur internet : <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/1%E2%80%99omm-confirme-que-2019-se-classe-au-deuxi%C3%A8me-rang-des-ann%C3%A9es-les-plus>
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 2020. Rapport inter-organisations met en évidence les répercussions croissantes du changement climatique sur l'atmosphère, les terres et les océans. Communiqué de presse du 10 Mars 2020. <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/journ%C3%A9e-m%C3%A9t%C3%A9orologique-mondiale-loc%C3%A9an-le-temps-et-le-climat-%C3%A0-1>
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 2020. Rapport : 2020 est en passe de devenir l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées. Communiqué de presse No 02122020. <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/2020-est-en-passe-de-devenir-1%E2%80%99une-des-trois-ann%C3%A9es-les-plus-chaude>
- Perrin, C, Michel, C et Andréassian, V., 2007. Modèles hydrologiques du génie rural (GR), Rapport, Edition CEMAGREF.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Prignon, M., 2016. Incertitudes sur les données climatiques en Afrique: intercomparaison de divers jeux de données. Mémoire de Master, université de Liège, Belgique.
- Saidi, A., 2007. Ministère des Ressources en Eau, direction des études et des aménagements hydrauliques, Algérie.
- Singh, V. 1995; Computer models of watershed hydrology.
- Taibi, S ; Feddal, MA ; Meddi, M et Mahé, G., 2017. Etat de la variabilité pluviométrique du Nord de l'Algérie entre 1936 et 2016 un retour vers la normale. (conférence ESC- 2017 à Hammamet Tunisie).
- Taibi, S ; Meddi, M et Mahé, G., 2019. Seasonal rainfall variability in the southern Mediterranean border: Observations, regional model simulations and future climate projections. *Atmósfera* vol.32 No.1 México ene. 2019.

- Taibi, S. Cours : Analyse et modélisation hydrologique.
- Taibi, S., 2016. Influence de la circulation atmosphérique générale sur les précipitations du Nord de l'Algérie. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique.
- Taibi, S; Anza, F.Z.H; Zeroual, S. ,2020. Etude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie). Algerian Journal of Environmental Science and Technology. June edition. Vol.7. No2. (2021)
- WCRP, 2018. WCRP Spotlight: The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) publié le 06 Juillet 2018 sur : <https://www.wcrp-climate.org/news/wcrp-newsletter/wcrp-news-articles/1347-wcrp-spotlight-the-coordinated-regional-climate-downscaling-experiment-cordex>
- Zennaki ,A ; Baba-Hamed, K ; Bouanan, A et Gherissi, R ,2020. Étude comparative des modèles hydrologiques conceptuels globaux GR et Gardénia appliqués au bassin versant de l'oued Boukiou (Nord-Ouest algérien), TSM 12 2020 pp 53-70.
- Zeroual, A ; Assani, A.A ; Meddi, H ; Bouabdelli, S ; Zeroual, S et Alkama, R, 2020. Assessment of Projected Precipitations and Temperatures Change Signals over Algeria Based on Regional Climate Model: RCA4 Simulatio. (HEC, volume 97), pp 135-159.
- Zeroual, A ; Assani, AA et Meddi, M. ,2017. Analyse combinée de la variabilité de la température et des précipitations en relation avec les indices climatiques dans le nord de l'Algérie sur la période 1972–2013, Hydrol. Res., (2017) 48 (2), 584-595.
- Benchikh, H et Kemmerchou, F, 2019. Impact of Climate Variability on Hydrology of the Western Mitidja Watershed, Algeria.
- Zeroual, A.; Assani, A. A; Meddi, M & Alkama, R. 2018. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim. Dyn. 52, 227–243 (2019).