

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب - البلدية 1-

UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA 1 –

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



MÉMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

**Évaluation des techniques de correction du biais des précipitations
sur l'amélioration de la simulation hydrologique : Cas du bassin
versant de la Chiffa**

Présenté par :

MADANI Amina Zoubida

MAHTOUT Sarah

Soutenu le : 21/09/2020

Devant le jury composé de :

- M. D. BENSALIA	Docteur, U. de Blida	Président
- M. A. HADDAD	Docteur, U. de Blida	Examineur
- Mme. S. TAIBI-FEDDAL	Docteur, U. de Blida	Promotrice
- M. A. Zeroual	Docteur, ENSH.de Blida	Co-promoteur

Promotion 2019/2020

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force d'accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons notre respect au président du jury ainsi qu'aux membres du jury d'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nous tenons à remercier notre promotrice Madame Taibi-Feddal Sabrina pour sa disponibilité, ses aides précieuses et ses conseils judicieux, ainsi que pour sa patience dont elle a fait preuve à notre égard et qui nous a permis de mener à terme ce travail.

Nous tenons à remercier également notre co-promoteur Monsieur Zeroual Ayoub pour son soutien, sa patience et surtout son accompagnement pendant tout le travail.

Nos remerciements s'adressent à notre Chef de département Madame Bouzouidja Souad et tous nos enseignants et enseignantes du département pour leurs efforts déployés dans le but de nous garantir une formation digne pour avoir notre diplôme.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien ce travail, de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à

Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments,

Pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices

Ma promotrice Madame Taibi-Feddal Sabrina pour son aide et ses précieuses conseils et orientations.

Mes chers frères : Mohamed Redha, Mustapha et Ahmed Mounir pour leur grand amour et leur soutien, je leur exprime ici l'expression de ma haute gratitude.

Mes chères Sœurs : Asma, Khadidja à qui je dois tout l'amour, avec tous les vœux de les voir réussir dans leurs vies.

Mes cousines : Imane et Aouatif, qui m'ont aidé et encouragé tout au long de ce travail.

Mes neveux : Anes et Ines .

Mes chères amies : Naziha et particulièrement mon binôme Sarah pour sa confiance, sa motivation, son sérieux, son aide durant tout le parcours de ce travail.

Et à toute ma famille et tous ceux que j'aime.

MADANI Amina Zoubida

Dédicace

Je dédie ce travail à

Mes très chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour tous les encouragements qu'ils ont su m'insuffler aux moments difficiles. Qu'ils trouvent dans ce mémoire, le témoignage de ma vive gratitude et de ma grande reconnaissance, pour l'énergie qu'ils ont su implanter en moi à tous les moments de mes études.

Ma très chère et Unique sœur Amina pour ses soutiens moral et ses conseils précieux tout au long de mon chemin.

Ma promotrice Madame Taibi-Feddal Sabrina pour sa générosité et ses précieuses directives qu'elle n'a cessé de me prodiguer.

Mon très cher binôme et copine Madani Amina Zoubida pour sa gentillesse, encouragement et motivation, et pour son indéfectible soutiens et sa patience infinies ;

Toute ma famille et à tous mes amis, que ce travail vous soit le témoignage de ma profonde affection.

Mahtout Sarah

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تقييم تأثير تغير المناخ على تدفقات مستجمعات مياه شفة من خلال مقارنة طريقتين لتصحيح التحيز "Delta" و "Quantile-Quantile". يتم توفير نتائج التدفقات المتوقعة من خلال نموذج المفاهيمي لتدفق المطر GR2M في البيئة R ، بالإضافة الى مخرجات بيانات هطول الأمطار ودرجة الحرارة من نموذجين مناخيين إقليميين CNRM و MPI لبرنامج Africa-Cordex ولسيناريوهين تمثليين لمسارات التركيز RCP4.5 و RCP8.5. يُظهر تقييم أداء النموذجين من خلال تقدير التحيز أن التحيزات مهمة للغاية وأن محاكاة الأمطار تختلف اختلافاً كبيراً عن الأمطار التي لوحظت خلال فترة التحكم 1981-2005 ، وهذا ليس بالنسبة لدرجات الحرارة ، ومن هنا تأتي الحاجة إلى تصحيح التحيز. أتاح النموذج الهيدرولوجي GR2M الذي تم التحقق من صحته في حوض شفة إقليمية محاكاة التدفقات المستقبلية خلال الفترة 2074-2099 من خلال المقارنة بين عمليات المحاكاة المستمدة من بيانات الإدخال غير المصححة والتي تم تصحيحها بطريقة Quantile-Quantile. أظهرت النتائج أن التدفقات المستقبلية التي تمت محاكاتها من البيانات الأولية لا تتماشى مع التطور المستقبلي لهطول الأمطار والتبخّر ، بينما تظهر التدفقات من البيانات المصححة نتائج أفضل ، مما يبرز أهمية تصحيح التحيز أثناء دراسات التأثير الهيدرولوجي. أخيراً ، تحاكي نماذج المناخ CNRM و MPI انخفاضاً بنسبة 5 ٪ في التدفقات السنوية بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين وفقاً لمعيار RCP 4.5 ، بينما يتوقع RCP 8.5 انخفاضاً بنسبة 10 ٪ وهو أكبر في الشتاء والخريف.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ ، نموذج تدفق المطر ، نماذج المناخ الإقليمية ، طرق تصحيح التحيز (Quantile-Quantile , delta).

Résumé

Ce travail a pour objectif l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les écoulements du bassin versant de la Chiffa par la comparaison de deux méthodes de correction de biais « delta » et « quantile-quantile ». Les résultats sont fournis par le modèle conceptuel pluie-débit GR2M dans l'environnement R, couplé aux sorties de données de pluies et de températures de deux modèles climatiques régionaux CNRM et MPI du programme Africa-Cordex et pour deux scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. L'évaluation des performances des deux modèles par l'estimation du biais montre que les biais sont très importants et les pluies simulées s'écartent énormément des pluies observées au cours de la période de contrôle 1981-2005, ce qui n'est pas le cas pour les températures, d'où la nécessité de la correction du biais. Le modèle hydrologique GR2 validé sur le bassin de la Chiffa a permis de simuler les débits futurs au cours de la période 2074-2099 en comparant entre les simulations issues de données d'entrée non corrigées et corrigées par la méthode quantile-quantile. Les résultats ont montré que les débits futurs simulés à partir de données brutes ne sont pas en adéquation avec l'évolution future des précipitations et des évapotranspirations alors que les débits issus des données corrigés montrent de meilleurs résultats, ce qui met en évidence l'importance de la correction de biais lors des études d'impact en hydrologie. Enfin les modèles climatiques CNRM et MPI simulent une diminution de 5% des écoulements annuels d'ici la fin du 21^{ème} siècle selon le RCP 4.5, alors que le RCP 8.5 prédit une réduction de -10% qui est plus importante en hiver et en automne.

Mots clés : Changement climatique, modèle pluie-débit, modèles climatiques régionaux, méthodes de correction de biais (quantile-quantile et delta)

Abstract

The objective of this work is to assess the impact of climate change on the flows of the Chiffa watershed by comparing two "delta" and "quantile-quantile" bias correction methods. The results are provided by the conceptual rainfall-runoff GR2M model in the R environment, coupled with the outputs of rainfall and temperature data from two regional climate models CNRM and MPI of the Africa-Cordex program and for two emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The evaluation of the performances of the two models by the estimation of the bias shows that the biases are very important and the simulated rains differ enormously from the rains observed during the control period 1981-2005, which is not the case for temperatures, hence the need to correct the bias. The GR2M hydrological model validated on the Chiffa basin made it possible to simulate future flows over the period 2074-2099 by comparing between simulations derived from uncorrected input data and corrected by the quantile-quantile method. The results showed that the future flows simulated from raw data are not in adequacy with the future evolution of precipitation and evapotranspiration whereas the flows resulting from the corrected data show better results, which highlights the importance bias correction during hydrological impact studies. Finally, the CNRM and MPI climate models simulate a 5% decrease in annual flows by the end of the 21st century according to RCP 4.5, while RCP 8.5 predicts a reduction of -10% which is greater in winter and autumn.

Keywords: Climate change, rainfall-runoff model, regional climate models, bias correction methods (quantile-quantile and delta)

Liste des abréviations

- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
- **CCNUCC**: Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
- **Cemagref** : Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du génie Rural, des Eaux et Forêts
- **CNRM** : Centre national de recherches météorologiques
- **CORDEX** : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
- **CRAN** : Conseil représentatif des Associations Noires
- **ETP** : Evapotranspiration potentiel
- **ETR** : Evapotranspiration réel
- **GES** : Gaz à effet de serre
- **GIEC** : Groupe intergouvernemental des experts sur le climat
- **GR**: Génie rural
- **IPCC**: Intergovernmental Panel on Climate Change
- **IRSTEA** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- **MCG** : Modèles climatiques global
- **MCR** : Modèles climatiques régional
- **OMM** : *Organisation météorologique mondiale*
- **ONM** : Office National de la Météorologie
- **Q-Q** : Quantile-Quantile
- **RCP**: Representative Concentration Pathway

Liste des figures

- **Figure 1.1** : Les projections climatiques de température, entre 1986-2005 et 2081-2100, en fonction des 4 scénarios d'émissions du GIEC.....5
- **Figure 1.2** : Evolution de la température moyenne à la surface de globe d'ici 2100 (pour différents scénarios climatiques RCP et SSP)..... 10
- **Figure 1.3** : Changements de cumul annuel de précipitations simulés entre (1981- 2010 et 2071-2100).....11
- **Figure 2.1** : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Chiffa.....15
- **Figure 2.2** : Courbes hypsométrique du bassin versant de l'Oued Chiffa.....18
- **Figure 2.3** : le cycle hydrologique.....21
- **Figure 2.4** : Représentation schématique de la modélisation pluie-débit.....24
- **Figure 2.5** : Classification des modèles hydrologiques.....25
- **Figure 2.6** : Structure générale d'un modèle hydrologique.....27
- **Figure 2.7**: Décomposition d'un modèle pluie débit.....28
- **Figure 2.8**: Schéma de la structure du modèle GR2M.....32
- **Figure 2.9** : Principaux éléments de package air GR.....36
- **Figure 2.10** : résultat du calage du modèle GR2M sur le bassin de la Chiffa.....37
- **Figure 2.11** : résultat de la validation du modèle GR2M sur le bassin de la Chiffa.....38
- **Figure 3.1** : Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite).....41
- **Figure 3.2** : Vue schématique de la technique de régionalisation.....42
- **Figure 3.3** : modèle climatique global.....43
- **Figure 3.4** : Principe de la réduction d'échelle (Technique downscaling).....44
- **Figure 3.5**: Schema illustrant la problematique de guidage d'un modèle climatique regional par un model climatique globale.....45
- **Figure 3.6** : Caractéristiques des scénarios RCP.....47
- **Figure 3.7** : Projection des températures.....47
- **Figure 3.8** : Séries temporelles des anomalies de la moyenne annuelle mondiale de la température de l'air en surface.....48
- **Figure 3.9** : Domaine d'application de CORDEX-Afrique.....51
- **Figure 3.10** : Schéma de la première phase de l'expérience CORDEX.....52

- **Figure 3.11** : Schéma des principales incertitudes touchant les projections climatiques régionales.54
- **Figure 3.12** : Exemple de la méthode de correction delta. Le changement relatif entre la période de référence et la période future est calculé (B) et appliqué à la série temporelle observée (D).....55
- **Figure 3.13**: Schéma des corrections de biais par quantile mapping.....57
- **Figure 3.14**: Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques.....59
- **Figure 3.15** : Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques.....60
- **Figure 3.16**: simulations des pluies futures par le modèle MPI et CNRM au cours de période de Projection et pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....61
- **Figure 3.17**: Projection des températures par les modèles CNRM et MPI à l'échelle annuelle au cours de la période de projection 2074-2099.....62
- **Figure 3.18**: Projection des températures par les modèles CNRM et MPI à l'échelle saisonnière au cours de la période de projection 2074-2099.....63
- **Figure 3.19**: Variation des ETP à l'horizon 2099 pour les deux scénarios RCP 4.5et 8.5 d'après le modèle MPI et CNRM.....64
- **Figure 3.20** : Différence entre les pluies observées et simulées (A), simulations futures après correction du biais par q-q (B) et delta (C). Cas du modèle CNRM, RCP 4.5.....65
- **Figure 3.21** : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle CNRM et les observations pour le RCP 4.5.....66
- **Figure 3.22** : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle CNRM et les observations pour le RCP 8.5.....67
- **Figure 3.23**: Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle MPI et les observations pour le RCP 4.5.....67
- **Figure 3.24** : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle MPI et les observations pour le RCP 8.5.....67
- **Figure 3.25** : variation des écoulements futurs (2094-299) par rapport aux observations (1981-2005) à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle selon le RCP 4.5.....69
- **Figure 3.26** : variation des écoulements futurs (2094-299) par rapport aux observations (1981-2005) à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle selon le RCP 8.5.....69

Liste des tableaux

- **Tableau 2.1:** Présentation de la station hydrométrique dans le bassin versant de Chiffa..16
- **Tableau 2.2:** Répartition interannuelle des températures de la zone d'étude.....19
- **Tableau 2.3:** Répartition interannuelle des précipitations pour le bassin versant de la Chiffa.....19
- **Tableau 2.4:** Répartition interannuelle de l'évapotranspiration pour le bassin versant de la Chiffa20
- **Tableau 2.5:** résultats de la modélisation pour la période de calage.....36
- **Tableau 2.6:** résultats de la modélisation pour la période de validation.....37
- **Tableau 3.1:** Modèles climatiques régionaux-CORDEX avec les modèles globaux associés.....53
- **Tableau 3.2:** le biais estimé entre les pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005.....59
- **Tableau 3.3:** le biais estimé entre les pluies observées et simulées saisonniers au cours de la période de référence 1981-2005.....59
- **Tableau 3.4:** le biais estimé entre les températures observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005.....61
- **Tableau 3.5:** le biais estimé entre les températures observées et simulées saisonniers au cours de la période de référence 1981-2005.....61

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Variabilité climatique à l'échelle globale et régionale.....	3
I.1. Variations climatiques observées à l'échelle globale.....	3
I.3. Les projections climatiques pour la fin du 21 ^{ème} siècle.....	9
I.4. Impact des changements climatiques sur l'hydrologie.....	12
Chapitre II : La modélisation Pluie-Débit dans le bassin de la Chiffa	15
II.1. Présentation du bassin versant de la Chiffa	15
II.1.1. Situation géographique	15
II.1.2. Caractéristiques géomorphologiques	16
II.1.3. La courbe hypsométrique.....	18
II.1.4. Les caractéristiques climatiques	19
II.2. La modélisation hydrologique	20
II. 2.1. Le cycle hydrologique	20
II.2.2. Qu'est- ce qu'un modèle hydrologique ?.....	23
II.2.4. Classification des modèles hydrologiques	24
II.2.5. Les variables d'un modèle hydrologique.....	26
II.2.6. Représentation de la relation pluie-débit	27
II.2.6.1. Fonction de production :	28
II.2.6.2. Fonction de transfert :	28
II.2.7. Les étapes d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit	28
II.2.8. Les critères de calage d'un modèle hydrologique.....	29
II.2.9. Les modèles hydrologiques GR	31
II.2.9.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :	32
II.3. Application du modèle GR2M au bassin de la Chiffa	34
II.3.1. Modèle GR2M sous L'environnement R.....	34
II.3.2. Calage et validation du modèle GR2M.....	36
Chapitre III: Les modèles climatiques régionaux et leur application sur le bassin de la Chiffa	39
III.1. Généralités sur les modèles climatiques	39
III.1.1. Définition d'un modèle climatique.....	39
III.1.2. Les types de modèles climatiques	40
III.1.2.1. Modèles climatiques globaux (MCG)	41
III.1.2.2. Modèles climatiques régionaux (MCR).....	42

III.1.3. Scénarios d'émissions.....	44
III.1.4. Simulations climatiques.....	46
III.1.5. Les sources d'incertitudes dans les projections climatiques.....	47
III.2. Les modèles climatiques régionaux CORDEX -Afrique.....	49
III.3. Les méthodes de correction des sorties de MCR.....	52
III.3.1.Méthode du Delta	53
III.3.2. méthode quantile-quantile	54
III.4. Impact des changements climatiques sur le bassin de la Chiffa	55
III.4.1. Evaluation des performances des MCR Cordex-Afrique	55
III.4.1.1. Simulation des pluies passées par les MCR	56
III. 4.1.2. Simulation des températures passées par les RCM	57
III.4.2. Projection Climatique à l'horizon 2099.....	59
III.4.2.1. Evolution future des précipitations	59
III.4.2.2.Evolution future des températures	59
III.4.2.3. Evolution future des ETP	61
III.4.3. Correction de biais des sorties de modèles climatiques par les méthodes quantile-quantile et Delta	62
III.4.4. Impact des changements climatiques sur les écoulements du bassin de la Chiffa.....	65
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	70

Introduction Générale

Introduction générale

Ces dernières années ont été marquées par une préoccupation grandissante au sujet du changement climatique. Cependant ce qui intéresse de plus en plus la communauté scientifique s'est bien l'impact environnemental et socio-économique de ces changements en vue de mettre en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation pour une gestion durable des ressources en eau, de l'agriculture, de l'énergie et de la biodiversité...etc.

Le groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit une augmentation de plus de 4°C d'ici la fin du siècle si aucune mesure n'est prise en compte. (GIEC, 2017)

Le bassin méditerranéen est considéré comme le hot-spot du réchauffement climatique. Les tendances annuelles et saisonnières observées de la température moyenne indiquent un réchauffement global qui est considérablement au-delà de la plage des changements due à la variabilité naturelle (IPCC, 2014).

Ainsi, du fait de sa position géographique, l'Algérie est très vulnérable aux changements climatiques (Boudiaf et al., 2020 ; Hadour et al. 2020). Des études ont déjà mis en évidence une augmentation des températures de 0.2-0.4°C/décade (Zeroual et al., 2016) et une baisse de la pluviométrie particulièrement dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie (Meddi 2009, Bekoussa 2008, Medjrab, 2005) caractérisée par un déficit de 13-35% (Taibi et al., 2013). Ce déficit a conduit à une diminution des potentialités du Nord de l'Algérie de 12,5 milliards de m³ aux années 70 à 10 milliards de m³ actuellement.

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant repose sur l'association de modèles climatiques et modèles hydrologiques. Les récentes avancées de la modélisation climatique et l'apparition de modèles régionaux ont permis de mettre à disposition des simulations passées et futures (1950-2100) de différentes variables climatiques tout particulièrement les pluies et les températures et pour différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ensuite, pour évaluer la réponse hydrologique des précipitations futures, un modèle hydrologique doit être calé et validé sur le bassin versant.

Cependant l'utilisation directe des sorties des modèles régionaux dans les études d'impacts reste relativement limitée du fait qu'elles sont fortement biaisées par rapport aux observations et que leur échelle spatiale est trop grossière alors que les études d'impacts nécessite une résolution plus fine. Pour y remédier des techniques de correction de biais sont utilisées. Celles-ci sont basées sur la comparaison entre les données simulées et observées sur une période passe. L'écart

entre les deux est considéré comme le biais ou l'erreur du modèle. Ainsi, la correction est estimée sur une période observée et la même correction est appliquée aux données des simulations de la période future. Parmi les méthodes de correction des biais couramment utilisées ; la méthode de delta et la méthode quantile-quantile.

C'est alors dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Chiffa par la comparaison de deux méthodes de correction de biais « delta » et « quantile-quantile ». Pour cela deux modèles climatiques régionaux de l'exercice Africa-Cordex sont choisis pour caractériser et quantifier le changement des précipitations et températures futures, en fonction de deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP4.5 et RCP8.5). Les simulations sont ensuite corrigées par les deux méthodes de correction avant d'être utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique GR2M pour générer les écoulements futurs à l'horizon 2050 et 2100.

Ce travail s'organise autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre expose une revue bibliographique sur les changements du climat observés à l'échelle globale et régionale et leurs impacts en hydrologie.
- Le deuxième se divise en deux parties, la première dresse à la présentation de la zone et ses caractéristiques géomorphologiques et hydro climatiques. La deuxième partie est consacrée à la modélisation Pluie-débit dans le bassin de la Chiffa
- Le troisième chapitre s'intéresse à l'évaluation des sorties des deux modèles climatiques régionaux Africa-Cordex et leur correction par les méthodes Delta et quantile-quantile afin de simuler l'évolution futures des écoulements dans le bassin de la Chiffa .

Chapitre 1

Variabilité climatique à l'échelle globale et régionale

Chapitre I : Variabilité climatique à l'échelle globale et régionale

I.1. Variations climatiques observées à l'échelle globale

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'organe des Nations Unies chargé d'évaluer les travaux scientifiques consacrés aux changements climatiques. Il a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement afin d'offrir aux décideurs des évaluations régulières du fondement scientifique de l'évolution du climat, des incidences et des risques associés et des possibilités d'adaptation et d'atténuation. Le GIEC établit ses évaluations dans le respect de procédures rigoureuses d'intégrité et conformément à ses grands principes d'objectivité, de clarté et de transparence. Ses rapports peuvent faciliter l'élaboration des politiques sans préconiser des mesures précises.

Depuis 1988, le GIEC a établi cinq rapports d'évaluation exhaustifs et plusieurs rapports spéciaux, ainsi que des rapports méthodologiques, il a été finalisé entre 2013 et 2014. Ses principales conclusions sont les suivantes:

- L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie ;
- Plus nous perturbons notre climat, plus nous courrons le risque de conséquences graves généralisées et irréversibles ;
- Nous avons les moyens de limiter les changements climatiques et de bâtir un avenir plus prospère et plus durable.

Le sixième Rapport d'évaluation sera prêt pour le premier bilan mondial au titre de la CCNUCC, lequel aura lieu en 2023, au cours duquel il produira trois rapports spéciaux (https://archive.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_fr.pdf)

Le changement climatique touche toutes les régions du monde, les calottes glaciaires polaires fondent et le niveau des océans augmente et une hausse de température dans certaines régions, les phénomènes météorologiques extrêmes et les précipitations sont de plus en plus exceptionnels, tandis que d'autres sont confrontées à des vagues de chaleur et des sécheresses de plus en plus extrêmes. (https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_fr)

Chargé de produire des avis scientifiques pour les négociations climatiques internationales, le GIEC estime les trajectoires climatiques possibles sous la contrainte de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Pour alimenter ces travaux, la communauté des modélisateurs du climat développe des exercices de simulations climatiques suivant des protocoles communs, afin de

comparer les résultats de l'ensemble des modèles de climat utilisés. Pour le 5^{ème} exercice du GIEC (2014), les estimations d'émissions ont été définies selon quatre scénarios socio-économiques (aussi appelés scénarios d'émissions, RCP) chaque scénario correspond à une concentration atmosphérique en gaz à effet de serre à l'horizon 2100. L'impact de cet effet de serre sur le climat est déterminé à l'aide du forçage radiatif. (Serge J et al. 2015)

Bien que les incertitudes liées aux scénarios socio-économiques à venir et les limitations des modèles numériques employés pour parvenir aux projections climatiques, les principaux modèles climatiques coïncident avec une intensification du réchauffement planétaire au cours des prochaines décennies. Cela pourrait engendrer une accélération de la variabilité du climat et des tendances identifiées jusqu'à présent au niveau de l'évolution des primordiales variables climatiques. Si ces projections se confirment, elles pourraient avoir de sérieux effets sur les caractéristiques climatiques, hydrologiques, environnementales. (Ana M et al. 2018)

Depuis peu d'années, les pluies ont provoqué de violentes inondations un peu partout dans le monde. En juillet 2007, la Grande-Bretagne a connu des graves inondations depuis plus de soixante ans. En 2008, les pluies de mousson ont été puissantes en Inde. En 2009, au Pakistan les pluies de mousson ont été particulièrement dévastatrices. En 2010, l'Australie a connu les plus grandes inondations de son histoire, avec près de quarante villes du Nord-Est du pays touchées et plus de 200000 personnes affectées. En 2011, la Thaïlande a subi les plus graves inondations dans le monde. Enfin, en 2013, l'Inde a fait face une nouvelle fois à une mousson rapide et violente, tandis que l'Europe centrale était touchée par des inondations d'une ampleur jamais observée depuis, près 500 conséquences des fortes pluies tombées sur l'Autriche, l'Allemagne, la Hongrie et la Tchéquie. (Nouaceur Z et al. 2013)

Un diagnostic de prédiction météorologique a été réalisé à partir des résultats préliminaires des projections climatiques définis dans le cadre du projet CLIMPY (provenant des données d'un ensemble de modèles climatiques mondiaux et de combinaisons de modèles climatiques régionaux) et en tenant compte les quatre scénario d'émissions globales (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5; RCP, sachant que le RCP2.6 est le scénario le plus optimiste et que le RCP8.5 est le plus pessimiste. (Ana M et al .2018).

Il est évident de noter que ces expériences ne fournissent pas une prévision à venir mais une « projection » du climat, permettant d'admettre comment le climat peut être amené à évoluer sous ces nouvelles contraintes d'émissions de gaz à effet de serre. (Serge J el al .2015)

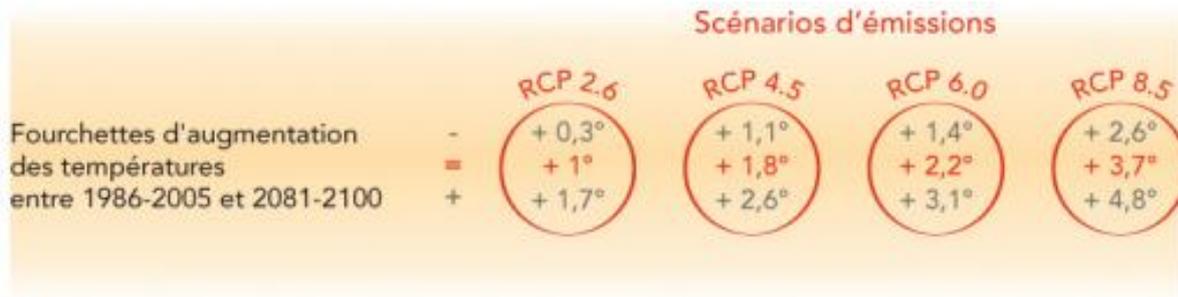


Figure 1.1 : Les projections climatiques de température, entre 1986-2005 et 2081-2100, en fonction des 4 scénarios d'émissions du GIEC. (Source : Serge Jet al, 2015)

Selon le Bulletin Américain Météorologique, pour 62 des 77 phénomènes répertoriés sur la période 2015–2017, l'influence anthropique sur la survenue du phénomène observé a été significative, ce constat étant fait par presque toutes les études consacrées à une vague de chaleur importante. D'autre part, plusieurs études concluent à une influence humaine sur le risque de précipitations extrêmes. (Peter S et al. 2019)

Si les États ne prennent pas, dès maintenant, des mesures fortes, la hausse de la température moyenne mondiale atteindra 6,5 à 7°C en 2100. Ce scénario, le plus pessimiste, est basé sur une croissance économique rapide alimentée par les énergies fossiles. D'après David Salas y Mélia, les sécheresses seront aussi "beaucoup plus longues et étendues", dans l'optimal des scénarios, qui implique une forte coopération internationale, la baisse immédiate des émissions de CO₂, la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2060 et une captation de CO₂ atmosphérique de l'ordre de 10 à 15 milliards de tonnes par an en 2100 ce qui techniquement est incertain ; il sera donc compliqué de limiter le réchauffement de la planète à 2°C, comme le prévoit l'Accord de Paris sur le climat de 2015 (Le Guen, 2019).

Selon le rapport de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur l'état du climat mondial en 2018 et la mise à jour sur les événements climatiques extrêmes en 2019 souligne que l'année 2019 a commencé, par un froid exceptionnel en Amérique du Nord et des vagues de chaleur extrême en Australie. Quant à l'étendue de la banquise arctique et antarctique, elle est inférieure à la normale (OMM, 2018).

Les effets du changement climatique s'aggravent au lieu de diminuer a affirmé le Secrétaire général de l'OMM. Ces effets sont illimités et pour s'adapter il est nécessaire d'investir dans les services d'alerte précoce et d'attacher une attention particulière aux prévisions axées sur les impacts.

I.2. Variations climatiques dans le bassin méditerranéen

Les pays du bassin méditerranéen (Portugal, l'Espagne, France, L'Italie, Malte, Croatie, Bosnie, Grèce, Turquie, Syrie, Liban, Egypte, Libye, Tunisie, Algérie ,Maroc) sont particulièrement affectés par le changement climatique causés par les effets combinés des modifications de l'utilisation des sols, de l'augmentation de la pollution et de la dégradation de la biodiversité qui menacent les ressources en eau, les écosystèmes, la nourriture, la santé et la sécurité avec une augmentation des températures supérieures à la moyenne.

La variabilité des précipitations du bassin méditerranée est associée à des périodes de sécheresse de plus en plus importante. La variabilité des températures présente des signes d'augmentation, notamment en été caractérisé par des vagues de chaleur estivale importante tandis qu'en hiver les vagues de froid sont en diminution.

De nombreuses études ce sont intéressées à l'évolution temporelle de précipitation et de température dans les différents pays de la méditerranées, la majorité de ces études ont noté une baisse des précipitations et une hausse des températures observées depuis les années 1970. L'étude menée par Raymond et al. (2016) a montré qu'à l'échelle du bassin méditerrané au cours de la période 1950-2013, une baisse des totaux annuels ainsi qu'une baisse du nombre de jours de pluie comprise entre 0.04% à 0.2%.

L'analyse du régime climatique en Turquie menée par Sinan J et al. (2018) durant la période 1901-2014 a mis en évidence des tendances à la hausse insignifiante des précipitations dans toutes les régions du pays, sauf le sud-est de l'Anatolie, où une tendance à la baisse a été observée, elle a aussi connu un renforcement de chaleur enregistré en milieu urbain qui atteint des valeurs de 1,74°C et 2,61°C à Istanbul sur une période 1960-2012 (Unal et al .2020)

En Grèce, l'analyse du régime pluviométrique au cours de la période 1940-2002 a montré une tendance à la baisse depuis 1950, dans la plupart des régions de ce pays (Markonis et al.2017). D'autre part les travaux de Tolika K. (2018) ont indiqué aussi que les pluies annuelles observées au cours de la période allant de 1958 à 2000, se caractérise par une concentration modérée au Nord de la Grèce qui diminue en se déplaçant vers le sud du pays. En outre, le Nord de la Grèce a connu une augmentation significative de la température moyenne annuelle allant de 1,6°C à 15,8°C observée au cours de la période 1984-2018. (Drogoudi et al .2020)

En Espagne, Serrano N et al. (2018) ont constaté une forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations quotidiennes au cours de la période 1950-2012 ainsi qu'une faible fréquence des pluies extrêmes, tandis que Cramer W et al. (2019) ont mis en évidence une forte sécheresse qui

a frappé le nord – ouest de l'Espagne au cours de la période 2008-2011, caractérisée par un déficit pluviométrique d'environ 10 à 15%. De plus, la température annuelle minimale et maximale a augmenté au cours de la période 1910-2013 de 0,06 et de 0,11°C par décennie respectivement, cette augmentation a été plus importante au cours de la période 1970-2013 de 0,23 et 0,57°C par décennie, dans ce pays le printemps est la saison qui présente le plus grand réchauffement avec 0,4°C pour la température minimal et de 0,9°C comme température maximale. (Pérez – Zanon N et al .2017).

L'Italie semble aussi être affectée par les variations climatiques de précipitations et de températures dont les études menées par (Caloiero et al.2018, Scorzini et Leopardi. 2019, Gentilucci et al.2019) où ils ont trouvé que la Sardaigne a enregistré une diminution des précipitations en hiver au cours de la période 1922-2011 alors que pour l'Italie centrale, ils ont trouvé une tendance négative mais non significative des précipitations annuelles durant la période 1951-2012, et une diminution des précipitations évidente en hiver. Leurs résultats montrent une tendance générale positive, avec une augmentation de température d'environ 0,7°C de 1961 à 1990,1981-2010 dans la province de Macerata (Italie centrale)

Les précipitation annelles moyennes sur le Portugal est d'environ 900mm avec une variabilité considérable ,sur le nord côtier les niveaux de précipitation sont les plus élevés (>2500mm) tandis que les plus faibles (<500mm/an) sont marqués sur la côte sud et la partie orientale du pays, en moyenne environ 42% des précipitations annuelles tombent pendant la saison d'hiver de 3 mois (décembre à février) ,et les valeurs de précipitations les plus faibles correspondant à seulement 6% des précipitations totales annuelles se produisent pendant l'été (juin à août) (Santo et al .2014). Par la suite le Portugal a connu une vague de chaleur d'Aout 2018 qui a été la plus chaude depuis celle de 2003 le récent changement climatique a exacerbé cet événement et le rendant au moins 1°C plus chaud que des événements similaires depuis 1950 (Barriopedro et al .2020)

Selon le bilan climatique météorologique, la France a connu une sécheresse record au cours de la période 2017-2018, où la variabilité de la pluviométrie a été déficitaire de 20% voire 30% .Concernant l'évolution des températures moyennes, elle enregistre une augmentation de température moyenne annuelle de 13,9°C qui a dépassé la normale de 1,4°C, plaçant l'année 2018 au 1^{er} rang des années les plus chaudes depuis le début du 20^{ème} siècle devant 2014 (+1,2°C) et 2011(+1,1°C).(Météo France.2018)

En Egypte, Mostafa A.N et al .(2019) ont constaté que les précipitations annuelles observées au cours de la période 1980-2017 ,ont connu une diminution significative d'environ 0,48 à0,9

mm/an .Un travail étudiant par Eid M.M et al .(2019) montre que les valeurs mensuelles saisonnières et annuelles de la température ont été analysées au cours de la période 1960-2016 , l'analyse des tendances présente qu'il y a une augmentation significative des valeurs saisonnières et annuelles de la température tel qu'une vague annuelle domine à toutes les stations , son amplitude pour les stations du nord est inférieure à celle des stations du sud avec une différence d'environ 7,5°C .Pour la moyenne mensuelle de température pour chaque mois de l'année a été réalisée montre que les gradients latitudinaux de température sont forts en hiver et en printemps .

Au cours de ces dernières années , les conditions climatiques actuelles se sont également aggravées en Afrique et plus particulièrement dans la partie Nord qui a connu une baisse importante des précipitations confirmée par plusieurs études menées en Algérie (Taibi et al .2019), au Maroc (Ouhamdouch S et al .2020) et en Tunisie (Melki A et al .2019)

Au Maroc, l'analyse du régime pluviométrique au cours de la période 1940-2015 menée par Ouhamdouch S et al .(2020) ont montré une variabilité interannuelle importante qui s'organise en alternance entre la période excédentaire de 1940-1956 et deux périodes déficitaires de 1956-1986 et 1998-2015 ,l'approche statistique relève une tendance significative en 1956 avec un déficit pluviométrique de 14,45% .Par la suite Aoubouazza M et al.(2019) indiquent une réduction des précipitations significatives notée de 15 à 22% dans le nord et de 9 à 16% au sud ce qui traduit un glissement du climat à caractère semi-aride vers le nord sur 65 ans allant de 1940 à 2015. Sur la même période, les courbes d'évolution des températures moyennes annuelles indiquent une tendance à un léger réchauffement de 1,7°C à 2,6 °C du climat du pays.

Selon Melki et al. (2019), l'analyse des données pluviométriques quotidiennes a montré que la tendance est inférieure à 5mm/jour au cours de la période 1960-2015 ce qui présente une diminution significative de précipitation sur le territoire tunisien. La température moyenne annuelle maximale et minimale enregistre une tendance à augmenter au cours de la période 1963-2016 ,tel que la température minimale annuelle moyenne a augmenté de 5,8°C entre 1963 (10,8°C) et 2016(16,6°C) ,et l'élévation de la moyenne des températures maximales quotidiennes a été estimée à 0,04°C. (Bellali H et al .2018)

L'analyse de la variabilité du régime pluviométrique du nord ouest de l'Algérie au cours de la période de référence 1961-1990 a relevé une baisse significative des précipitations depuis les années 1970 associée à une réduction du nombre de jours de pluies des classes 10-20mm et 20-50 mm respectivement en mois de décembre et janvier (Taibi et al .2019). Ce résultat a été aussi observé par Hallouz F et al. (2019) qui ont constaté que le nombre de jours de fort débit

diminue du nord vers le sud dans le bassin de l'oued Mina ainsi qu'une tendance décroissante des précipitations annuelles pendant la période de 1979 à 2013. Ainsi qu'au cours de la période 1960-2010 la région Nord-Ouest de l'Algérie a gravement été touché par une sécheresse dans différentes échelles de temps (Achour K et al .2020). Les séries de températures montrent une tendance à la hausse à long terme avec des ruptures graduelles des valeurs moyennes qui reflètent une lente augmentation de la température depuis les années 1970 sur toute la cote algérienne, durant 1972-2013 (Zeroual A et al .2017). Mebarkia et al. (2020) ont également mis en évidence une augmentation de 9% de température de l'air dans le nord-est algérien au cours de la période allant de 1988 à 2012.

I.3. Les projections climatiques pour la fin du 21^{ème} siècle

Les projections climatiques représentent la réponse du système climatique pour un scénario d'évolution (les différents RCP) des gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines (chauffage et climatisation, transports, industries, etc.) et de forçage radiatif calculé grâce à un modèle climatique. Pour démarrer une projection il nécessite un état initial qui va couvrir l'ensemble de la période historique enregistrée et des hypothèses sur l'évolution de la démographie et des modes de vie à travers la planète.

Depuis la période préindustrielle (1850), la température à la surface du sol a augmenté presque deux fois plus que la température moyenne mondiale, les changements climatiques ont contribué à la désertification, à la dégradation des sols et à l'insécurité alimentaire dans de nombreuses régions du monde. Des conséquences encore plus graves sont à prévoir dans le futur, selon tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. (Arneeth et al .2019)

Lors de la préparation du 5^{ème} Rapport, une approche différente a été adoptée afin d'accélérer le processus d'évaluation. Pour analyser le futur du changement climatique, les experts du GIEC ont cette fois défini a priori quatre trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés RCP (« Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration»). Ces RCP sont utilisés par les différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes ...), les climatologues en déduisent des projections climatiques globales ou régionales, les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques compatibles avec les RCP.

Ils ont été traduits en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Ce dernier représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le

rayonnement infrarouge réémis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude) sous l'effet de facteurs d'évolution du climat.

Les 4 profils de RCP sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m^2 (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe.

Le profil RCP 8.5 est le plus extrême (pessimiste). Il est un peu plus fort que le scénario le plus marqué utilisé dans les simulations du rapport du GIEC 2007 (A2).

Les profils RCP6.0 et RCP 4.5 correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios A1B et B1.

Enfin, le profil RCP 2.6 est sans équivalent dans les anciennes propositions du GIEC. En effet, sa réalisation implique une intégration des effets de réduction des émissions susceptibles afin de limiter le réchauffement planétaire à $2^{\circ}C$. (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>)

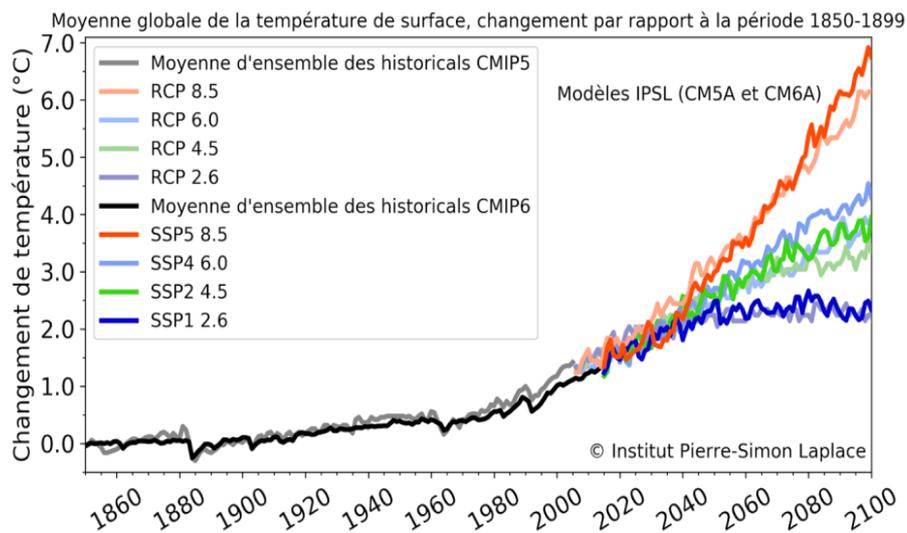


Figure 1.2 : Evolution de la température moyenne à la surface de globe d'ici 2100 (pour différents scénarios climatiques RCP et SSP). (Source : Boucher O et al. 2019)

Selon le scénario le plus pessimiste (SSP5 8.5) (fig. 1.2), l'augmentation de la température moyenne globale par rapport à la période 1850-1899 atteindrait 6 à $7^{\circ}C$ en 2100, Précisons que dans le rapport du (GIEC ,2014), le scénario RCP8.5 prédit une augmentation de $2^{\circ}C$ par rapport à la période préindustrielle.

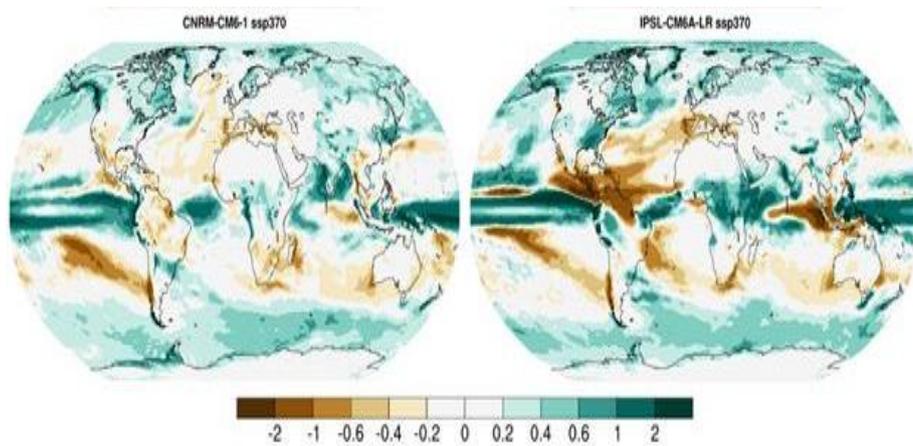


Figure 1.3 : Changements de cumul annuel de précipitations simulés entre (1981- 2010 et 2071-2100). (Boucher O et al. 2019)

L'évolution des précipitations simulées par les deux modèles français (l'IPSL et CNRM-CM6) comparable en intensité et en terme de structure géographique à celle présentées dans le 5^{ème} rapport du GIEC(2014) (RCP 2,6 et RCP 8,5). Les précipitations aura lieu probablement augmenter dans une grande partie du Pacifique tropical et sur les mers australes et dans de nombreuses régions des moyennes à hautes latitudes de l'hémisphère nord d'ici la fin de siècle. Comme dans la région méditerranéenne s'assèche, de même que de nombreuses régions semi-arides se concorde avec même prévision marquée dans le dernier rapport de GIEC (2014) leurs résultats prédits une augmentation des précipitations aux latitudes élevées et l'océan pacifique équatorial a l'horizon 2100.

En Méditerranée, les températures annuelles moyennes sont aujourd'hui d'environ 1,5°C au-dessus des moyennes avant la révolution industrielle (1880-1899) et supérieures aux tendances mondiales en matière de réchauffement ; Toujours dans cette région, Un réseau de plus de 600 scientifiques (MedEcc) qui regroupe les pays européens et du bassin méditerranéen a présenté un rapport concernant les effets du changement climatique sur le bassin méditerranéen qui se manifestent par une augmentation de la température dans la région qui pourrait atteindre près de 4°C d'ici 2040. Une augmentation de la température de 2 à 4°C dans le sud de l'Europe en 2080 provoquerait une baisse importante et généralisée des précipitations pouvant atteindre jusqu'à 30 %. Une hausse d'un degré de la température à l'échelle mondiale entraînerait une baisse d'environ 4 % des précipitations dans la majeure partie de la région, notamment dans le sud. La durée des épisodes de sécheresse pourrait aussi croître de 7 % si la température mondiale venait à augmenter de 1,5°C. Enfin, les épisodes de fortes pluies pourraient s'intensifier de 10 à 20 % durant toutes les saisons, sauf l'été. Tandis qu'une baisse des précipitations associée à

l'intensification du réchauffement contribue à des tendances fortes vers un assèchement du climat. (Cramer W et al. 2019).

I.4. Impact des changements climatiques sur l'hydrologie

L'étude de l'évolution du climat et les zones climatiques en Algérie est essentielle, notamment pour le passé récent et de vérifier leurs déplacements dans le futur suite à la baisse des précipitations remarquées suivant les différents scénarios des gaz à effet de serre. (Zeroual A., 2016)

Taibi S. et al. (2019) ont analysé les précipitations saisonnières simulées par les modèles, CNRM, ETHZ et GKSS du projet ENSEMBLE sur les périodes 2021-2050 et 2070-2099 et ont montré une baisse significative des précipitations en hiver et au printemps pour 2050, qui s'aggrave en 2099.

Zeroual A et al. (2020) ont appliqué des modèles climatiques régionaux CORDEX afin d'étudier les changements futurs au cours du 21^{ème} siècle estimés par deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) et leur impact sur le déplacement des zones climatiques. Les résultats ont mis en évidence une expansion significative de la superficie de la zone désertique à un taux approximatif de $650 \pm 160 \text{Km}^2/\text{an}$ d'ici la fin du 21^{ème} siècle ainsi qu'un rétrécissement brutal d'environ 30% de la zone climatique tempérée chaude avec un taux de $1086 \pm 270 \text{Km}^2/\text{an}$.

À l'issue de l'étude sur l'impact du changement climatique Hadour A et al. (2020) ont montré que dans les bassins trois grands bassins hydrographiques qui sont le Chéllif, la Tafna et la Macta pour le scénario RCP8.5, prévoit une diminution des pluies d'hiver de 38% en moyenne pour le 1^{er} horizon (2039) et 31% au 2^{ème} horizon (2069), pour la fin du 21^{ème} siècle (2099), une baisse de 40% est observée. De plus, les pluies de printemps augmenteront en moyenne de 17% sur les trois horizons futurs. Par contre, le RCP4.5 prévoit une diminution des pluies d'hiver et de printemps d'environ 27% et 65% respectivement. Les températures moyennes augmenteront d'environ 2 ° C pour chacun des horizons.

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur les flux dans ces bassins se fait au moyen du modèle hydrologique GR2M à partir des données de scénarios climatiques du modèle CNRM-CM5. le scénario RCP8.5 prévoit une baisse des débits hivernaux d'environ 33% en moyenne dans tous les bassins étudiés d'ici 2039, 31% d'ici 2069 et 50% d'ici la fin du 21^{ème} siècle tandis que le scénario RCP4.5 prévoit une diminution d'environ 50 à 60% pour les trois horizons. De plus, la diminution est estimée à 80% pour les débits printaniers selon le scénario RCP4.5. En revanche, le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation de 25% pour la même

saison. Pour cela on peut conclure que le scénario RCP8.5 maintient l'irrégularité spatiale des précipitations car les précipitations dans la partie centrale de Chélif sont importantes à la fois dans ses parties est et sud, mais la partie centrale du Chélif est plus affectée que sa partie Est selon le scénario RCP4.5. La réalité hydrologique modélisée ne correspond pas bien à la réalité hydrologique observée en automne et en été, puisque le modèle CNRM-CM5 surestime les pluies d'hiver et d'automne par rapport aux valeurs de la période de référence sur laquelle le calibrage est effectué Cette situation a un impact majeur sur l'agricole

Les travaux de Taibi S et al. (2016,2020) ont utilisé les sorties de modèles climatiques régionaux(MCR) du Projet Ensemble, Il s'agit d'évaluer la performance ou la capacité des différents modèles climatiques à reproduire la variabilité des précipitations passées. Les pluies simulées sont comparées aux pluies observées sur la période de contrôle 1961-2000 par l'estimation du biais. Les modèles sous-estiment une évolution future des précipitations moyennes et extrêmes est basée sur les sorties des 4 modèles performants aux périodes de projection 2021-2050 et 2070-2099. L'ensemble des modèles simulent une réduction des pluies annuelles d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Les saisons d'hiver et de printemps connaîtront une baisse significative des précipitations d'environ 30% à 60%. En automne et en été, certains modèles simulent une baisse des précipitations, alors que d'autres simulent une augmentation des précipitations futures. Il faut noter aussi la présence d'incertitudes qui influencent ces résultats d'avoir quantifié et corriger ces incertitudes qui permettront une meilleure appréciation des projections climatiques, mais peut d'étude en Algérie s'intéresse à la correction de biais tandis que certaines régions de bassin méditerranées ont quantifié et corrigé cette erreur.

Les simulations du modèle le plus optimiste RC4-CNRM-CM5 dans le bassin cas du bassin de Ain DALIA (Souk Ahras) montrent respectivement une augmentation de 1,3 °C et 3,7°C des températures aux horizons 2050 et 2100 ainsi qu'une diminution de la pluviométrie en saisons humides (hiver et printemps) qui varie de moins 5% à l'horizon 2050 à 28% à l'horizon 2100. Pour les simulations des écoulements futures les débits simulés par le modèle RCA4-MPI-ESM-LR à l'horizon 2050 montrent une diminution importante de 30% durant la période humide (d'octobre à mai), tandis qu'elle dépasse 50% à l'horizon 2100 et atteint 64% selon le scénario pessimiste (RCP 8.5). Le modèle RCA4-CNRM simule une diminution de 5% à l'horizon 2050 et 20% à l'horizon 2100 selon le scénario RCP4.5, alors que le scénario pessimiste simule respectivement une diminution de 13% et 44%. A cet effet, la disponibilité des eaux superficielles collectées au barrage d'Ain Dalia risque de diminuer de 5 % à 13 % à l'horizon 2050 et de 21% à 44% à l'horizon 2100 .

Selon différents scénarios d'émission appliqué dans le bassin de Cheliff pour les différents horizons (2020, 2025, et 2050) par Elmeddahi et al. (2019) ont montré que le modèle UKH1 indiquerait un réchauffement de l'ordre de 0,6 à 1,1 °C en 2020 et de 0,95 à 2,2 °C en 2050, ces scénarios s'accordent sur une diminution des précipitations annuelles, en moyenne entre 10% et plus de 30% à la fin du 21^{ème} siècle. Ces résultats reflètent la disponibilité des ressources en eau, qui tendra à diminuer, tel qu'un modèle conceptuel prévoyait un déficit de flux d'écoulement allant de 10 à 48% pour les prochaines décennies dans ce bassin.

L'Algérie est considérée comme un pays particulièrement vulnérable à une pénurie d'eau aiguë dans les années à venir. Un déficit hydrique important dû à la croissance démographique et une augmentation de la demande en eau à moyen et à long terme associée par différents secteurs va engendrer une contrainte pour répondre aux besoins en eau. Face à ces défis, le pays a mis en place un plan de gestion des ressources en eau par la construction de nouveaux barrages.

Conclusion

Plusieurs travaux ont été réalisés à travers le monde entier, sur les changements climatiques qui entraînent des variations avec un rythme et une amplitude qui varient d'une région à une autre, à moyen et à long terme, sur une échelle globale et régionale. Ces études ont montré, pour le passé, une hausse des températures moyenne accompagnée d'une diminution du régime pluviométrique.

Concernant l'évolution futur du climat, les projections climatiques indiquent des variations climatiques inquiétantes, alors on demande de faire appel à un large éventail comme mesure d'adaptation qui peut être mise en œuvre pour faire face aux conséquences du changement climatique ce qui donne naissance à une utilisation des modèles climatiques et hydrologiques et montre leur importance dans la compréhension du climat et c'est ce qu'on va entamer dans les prochains chapitres.

Chapitre 2

La modélisation Pluie-Débit dans le bassin de la chiffa

Chapitre II : La modélisation Pluie-Débit dans le bassin de la chiffa

Introduction

Les études d'impacts des changements climatiques sur l'hydrologie reposent sur l'association des scénarios climatiques aux modèles hydrologiques pour pouvoir évaluer les variations futures des écoulements. Ce chapitre présente les différents processus hydrologiques et leur prise en compte dans les modèles hydrologiques ainsi qu'une application au bassin de la chiffa en utilisant le modèle conceptuel GR2M.

II.1. Présentation du bassin versant de la Chiffa

II.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Chiffa se trouve dans la wilaya de Blida et fait partie du bassin côtier Algérois. Il se situe entre les latitudes $36^{\circ} 10'$ et $36^{\circ}30'$ Nord et entre les longitudes $2^{\circ} 30'$ et 3° Est.

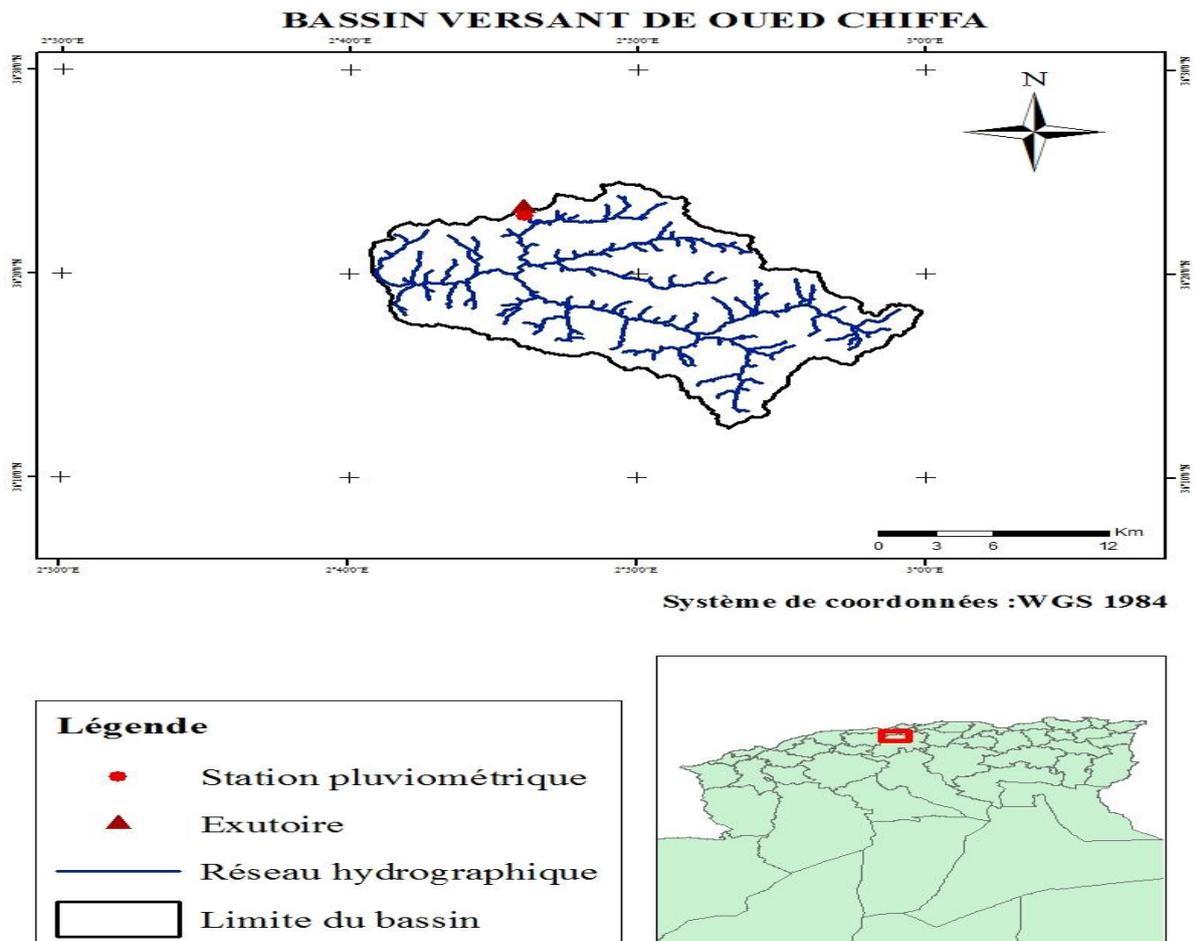


Figure 2.1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Chiffa

Les données hydro-climatiques utilisées dans le cadre de cette étude reposent sur :

- Les données pluviométriques de la station pluviométrique Amont des gorges de l'ANRH observées au cours de la période 1979-2014.
- Les données hydrométriques de la station : longitude (X=3.13) et latitude (Y=36.41)
- Les températures de la station de dar el Beida de l'ONM

Tableau 2 .1: Présentation de la station hydrométrique dans le bassin versant de Chiffa,

Code	Nom	X	Y
21126	Amont des gorges ou chiffa	3.13	36.41

II.1.2.Caractéristiques géomorphologiques

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant sont importantes à étudier vu qu'elles interviennent, et d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent sa réponse hydrologique, et notamment le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

- Surface :

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits seront en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre.

La superficie du bassin de la Chiffa est de : $A= 315.68 \text{ km}^2$

- Périmètre :

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le bassin de la Chiffa est caractérisé par un périmètre $P= 95.02 \text{ km}$.

- Indice de compacité de Gravelius :

L'indice de compacité (K_c) nous renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (Roche, 1963) :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

K_c : Indice de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre du bassin versant en km ;

A : Superficie du bassin versant en km².

Le bassin de la Chiffa est caractérisé par un $K_c = 1.50$. le bassin est donc de forme allongée.

- Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (Roche, 1963) :

La longueur L :

$$L = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

La largeur l :

$$l = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] = \frac{A}{L}$$

L= 39.63 km ; l= 7.97 km

- Longueur du cours d'eau principal :

C'est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a une confluence et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant ; exprimée en km. Si les deux segments à la confluence sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

$$L_T = 25.1 \text{ km}$$

II.1.3. La courbe hypsométrique

Cette courbe fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude, aussi elle peut servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

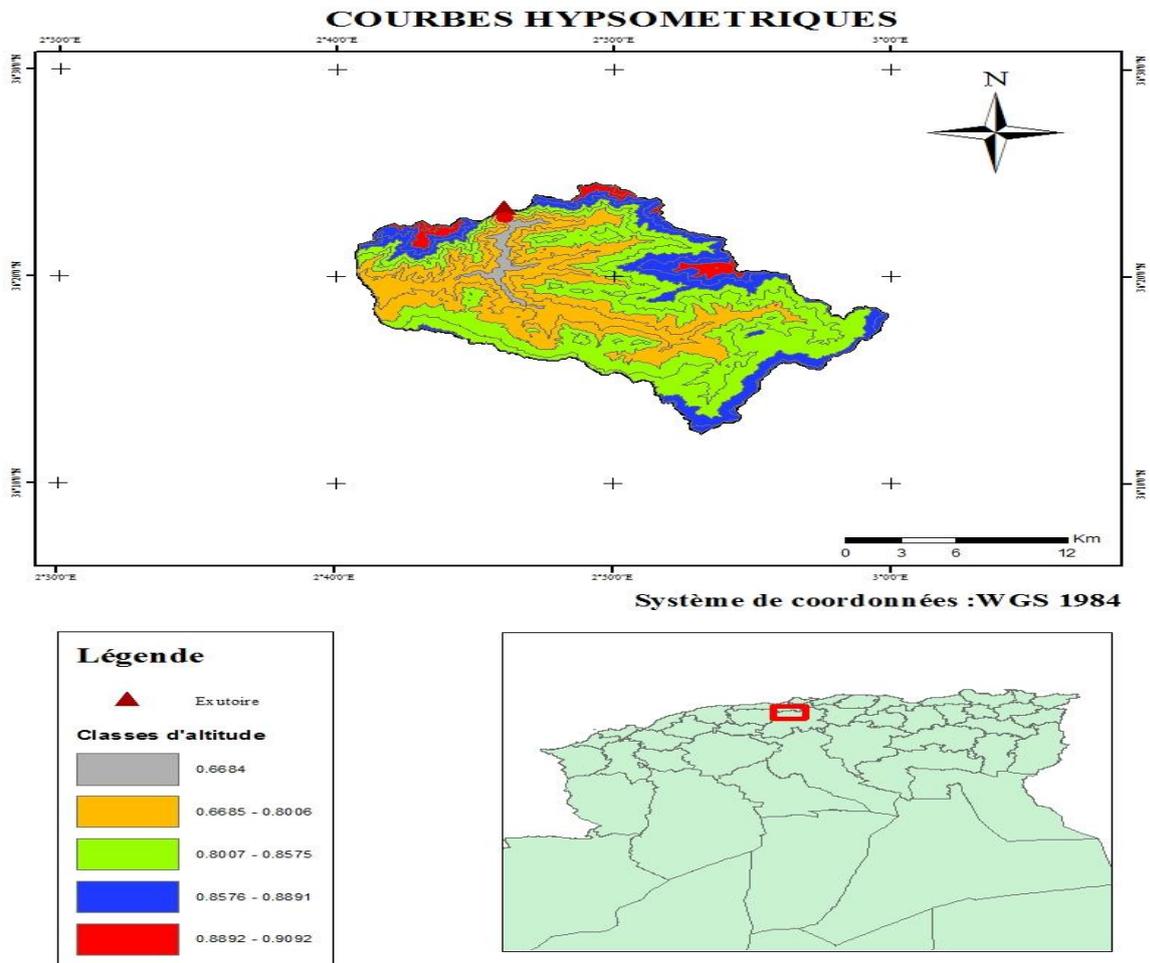


Figure 2.2 : Courbes hypsométrique du bassin versant de l'Oued Chiffa

II.1.4. Les caractéristiques climatiques

La région d'étude jouie d'un climat méditerranéen avec une température moyenne d'environ 17C° et d'un cumul de pluie qui atteint les 800mm.

➤ Les températures :

La répartition des températures moyennes interannuelles au cours de la période 1979 à 2014 (tableau II.1) montre que le mois d'Aout affiche une valeur maximale de 26.3 C° alors que le mois le plus frais est celui de Janvier avec une température de 8.5 C°.

Tableau 2.2 : Répartition interannuelle des températures de la zone d'étude

Mois	Jan.	Fev.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Température moyenne interannuelle (c°)	8.5	9.0	11.1	13.2	17.1	22.2	26	26.3	22.8	18.8	13.3	9.5

➤ La pluviométrie :

La répartition des précipitations mensuelles interannuelles au cours de la période 1980-2013 (tableau II.2) indique que le mois le plus pluvieux est celui de Décembre avec 118.5 mm et le mois de Juillet est le plus sec avec seulement 5.9 mm.

Tableau 2.3 : Répartition interannuelle des précipitations pour le bassin versant de la Chiffa

Mois	Jan.	Fev.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Précipitations interannuelles (mm)	111.5	105.7	82.6	78.2	52.9	11.0	5.9	10.7	33.4	60.5	95.6	118.5

➤ L'évapotranspiration potentielle :

Le concept d'évapotranspiration potentielle (ETP) permet de représenter la demande évaporatoire de l'atmosphère. En modélisation pluie-débit, l'ETP est souvent utilisée, contrairement à la réelle (ETR), son estimation ne nécessite que la connaissance de paramètres liés à l'atmosphère pour son calcul.

L'estimation de l'ETP à l'échelle du bassin de la Chiffa a été établie en utilisant la formule d'Oudin et al. (2005) sous le logiciel R studio qui est donnée par l'équation suivante :

$$PE = \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_a + K_2}{K_1}$$

Si : $T_a + K_2 > 0$; Sinon : $PE = 0$

Avec :

PE : Evapotranspiration potentielle (mm/jour) ;

R_e : Radiation extra-terrestre (MJ m⁻²/jour) calculée en fonction de la latitude et du jour ;

T_a : Température journalière en °C ;

λ : Flux de chaleur latente (2.48 MJ/Kg) ;

ρ : Densité de l'eau (Kg/m³)

K_1 : est le facteur d'échelle indépendant des valeurs PE de Penman (°C)

K_2 : est le facteur permettant de faire varier le seuil de température de l'aire, c'est -à-dire la valeur minimale de la température de l'aire pour laquelle PE n'est pas nul (°C).

Le tableau suivant présente la répartition de l'ETP mensuelle interannuelle estimée au cours de la période 1979-2014.

Tableau 2.4 : Répartition interannuelle de l'évapotranspiration pour le bassin versant de la Chiffa

Mois	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
ETP Interannuelles (mm)	62.68	61.06	78.4	83.73	99.77	114.7	136.8	281.9	250.9	221.9	160.2	129

On remarque que l'évapotranspiration est à son maximum pendant le mois d'aout et ce du fait de la chaleur en ce mois d'été, le mois de Février enregistre la valeur minimale d'ETP (61.06 mm).

II.2. La modélisation hydrologique

II. 2.1. Le cycle hydrologique

La figure 2.3 représente les composantes de base du cycle hydrologique et incluent : les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration ; etc. Le cycle de l'eau transporte de l'eau et de l'énergie, deux facteurs essentiels dans le fonctionnement du climat : si le climat change, le cycle hydrologique change et vice versa. Ce mouvement d'eau entre les différentes phases du cycle hydrologique est irrégulier dans l'espace et dans le temps pouvant produire des extrêmes d'inondations et de sécheresses (Henine H., 2005).

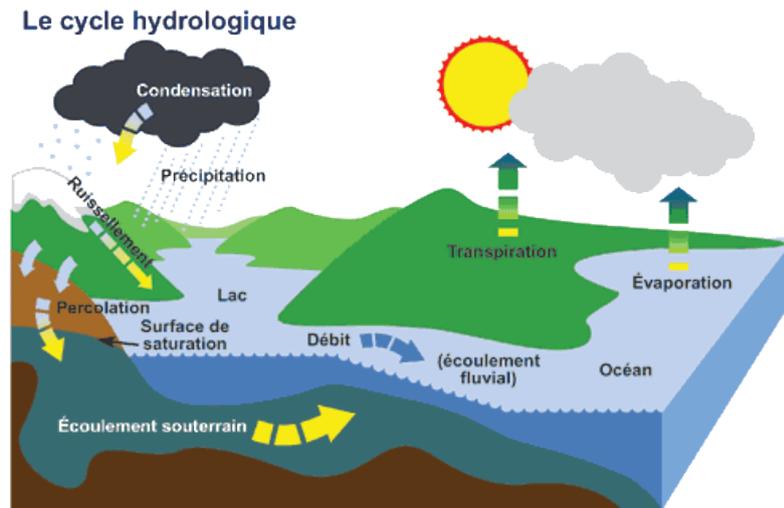


Figure 2.3 : le cycle hydrologique.

(Source: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/notions-elementaires/cycle-hydrologique.html>)

Les différents composants du cycle de l'eau sont définis comme suit :

- **Évaporation :**

Chauffées par le soleil, les molécules superficielles de l'eau déposent suffisamment d'énergie pour se libérer de l'attraction qui les lie entre elles, puis elles s'**évaporent** et montent dans l'atmosphère sous forme de vapeur invisible.

- **Transpiration :**

Les feuilles des plantes dégagent de la vapeur d'eau par le phénomène de la transpiration. Une plante en croissance **transpire** ainsi chaque jour de 5 à 10 fois la quantité d'eau qu'elle peut contenir.

- **Condensation :**

La vapeur d'eau se refroidit et finit par **se condenser** en se condensant, elle redevient liquide ou passe directement à l'état solide (glace, grêle ou neige). Ces particules d'eau s'assemblent pour former des nuages.

- **Précipitations :**

Les précipitations sous forme de pluie, de neige et de grêle proviennent des nuages. Ces derniers tournent autour de la terre grâce à l'action des courants atmosphériques, les nuages se refroidissent et deviennent saturés de gouttelettes d'eau que ces dernières commencent à tomber en pluie, en grêle ou en neige, selon la température de l'air ambiant.

- **Ruissellement :**

La pluie ou la fonte des neiges excessives peuvent produire un écoulement de surface vers les ruisseaux et les fossés, le ruissellement est l'écoulement d'eau que l'on peut voir dans les ruisseaux, les lacs et les cours d'eau lorsque l'eau emmagasinée dans un bassin s'en écoule.

- **Infiltration :**

Une partie des précipitations et de l'eau provenant de la fonte des neiges s'écoule, **percole** ou **s'infiltré** dans les fissures du sol et de la roche jusqu'à ce qu'elle accède la surface de saturation pour devenir une eau souterraine. (<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/notions-elementaires/cycle-hydrologique.html>)

L'équation de continuité hydrologique pour n'importe quel système s'écrit sous la forme suivante :

$$I - Q = \frac{ds}{dt}$$

Avec :

I : Entrée du système en vol/temps ;

Q : Sortie du système en vol/temps ;

$\frac{ds}{dt}$: Variation de stockage du système en vol/temps.

Le modèle mathématique du bilan hydrologique de la figure précédente s'écrit sous la forme suivante (en tenant compte de toutes les composantes du cycle hydrologique exprimées en unité de hauteur) :

$$P-R-G-E-T = \Delta S$$

Avec :

ΔS : Variation du stockage.

La mesure du débit de sortie d'un bassin versant est d'une grande importance pour un hydrologue, surtout quand il s'agit du contrôle de phénomène d'inondation, d'équilibrage des cours d'eau, et du dimensionnement des ouvrages hydrauliques. À fin de répondre d'une façon correcte à leurs besoins, les hydrologues ont développé des outils que l'on appelle modèles hydrologique. (Henine H., 2005)

II.2.2. Qu'est- ce qu'un modèle hydrologique ?

Il s'avère important, avant d'entamer l'étude de façon approfondie, de définir ce qu'est un modèle afin d'expliquer les choix de l'outil de modélisation utilisé dans notre étude. Un modèle permet donc d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes. Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité. Un modèle hydrologique est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant pour expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes) dont l'apparition d'une multiples modèles mathématiques.

On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie :

- a. La modélisation comme outil de recherche** : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- b. La modélisation comme outil de prévision** : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval)
- c. La modélisation comme outil d'extrapolation** : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, tel que le dimensionnement de déversoir, sécurité des barrages hydroélectriques ou encore la délimitation des zones inondables.

II.2.3. La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants

Elle est incontournable chaque fois qu'on s'intéresse à des problèmes liés à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation). Cette modélisation doit décrire d'une manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. On l'utilise aussi pour obtenir des informations concernant le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. (Djelloul F., 2014)

Un modèle hydrologique n'a pas pour but d'approcher au plus près la réalité physique des phénomènes qui se déroulent dans un bassin versant, mais de prévoir au mieux les débits à

l'exutoire d'un bassin versant et accessoirement d'un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques sur les ressources en eau. (Djelloul F., 2014)

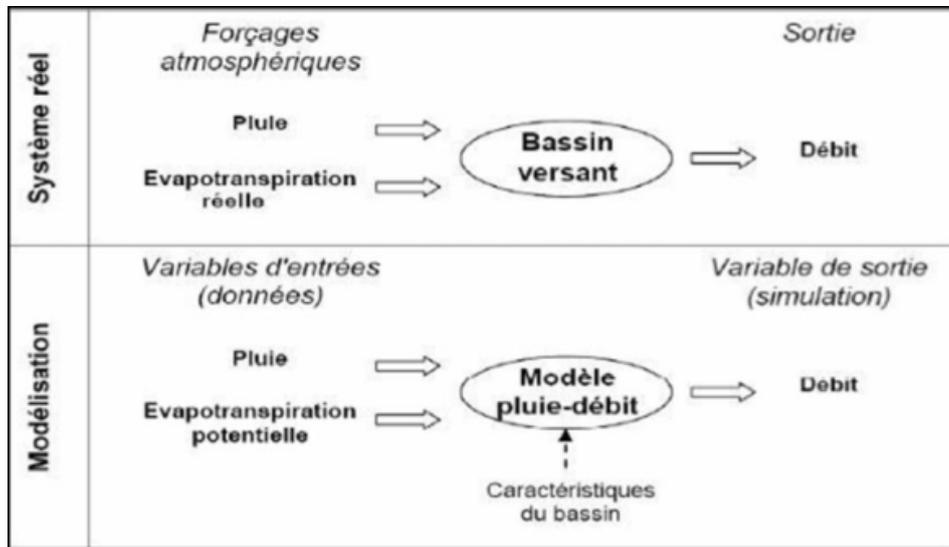


Figure 2.4 : Représentation schématique de la modélisation pluie-débit.

(Source: Djelloul F, 2014)

L'objectif d'un modèle hydrologique est de répondre à des besoins, entre autre :

- 1- la représentation du cycle de l'eau pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant ;
- 2- la simulation des débits, afin de reconstituer les débits lacunaires et même les débits non jaugés ;
- 3- la prévision des débits de crues (anticipation des événements futurs) ;
- 4- la recherche et la prédétermination des débits pour le dimensionnement de certains ouvrages hydrauliques (barrage, canal d'assèchement)
- 5- la gestion des ressources en eau (contrôle et diagnostic du fonctionnement d'une structure hydraulique, optimisation des règles de gestion d'un aménagement.etc). (Taibi., 2019)

II.2.4. Classification des modèles hydrologiques

Il existe, dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques des bassins versants ayant chacun leurs spécificités et leurs domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. Les classifications de modèles que l'on trouve dans la littérature sont nombreuses et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques.

La figure suivante donne une classification des modèles hydrologiques basée sur ces critères.

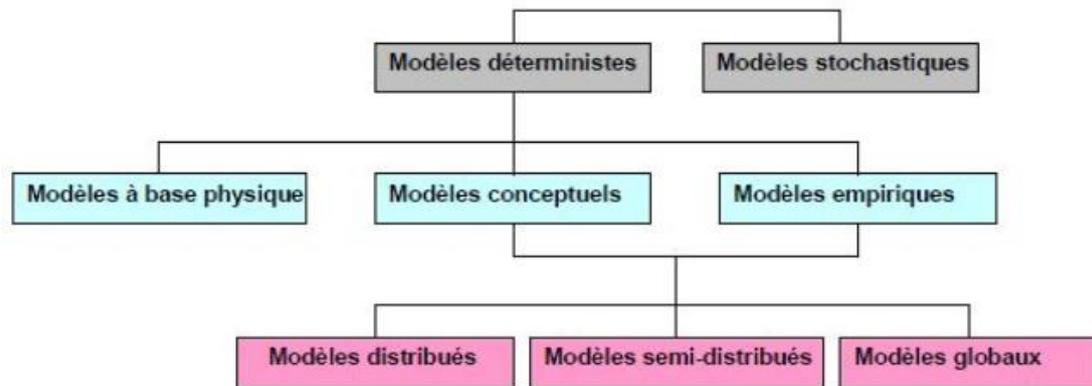


Figure 2.5 : Classification des modèles hydrologiques.

(Source: Djelloul F., 2014)

- a. **Modèles stochastiques :** l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions.
- b. **Modèles déterministes :** Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit des grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes.
- c. **Modèles à base physique :** basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportent idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.
- d. **Modèles empiriques :** reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro-système considéré. Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système.
- e. **Modèles analytiques :** Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées.
- f. **Modèles conceptuels :** utilisés dans le domaine de la modélisation de la relation pluie-débit à grand pas de temps (interannuel, annuel, mensuel). Ces modèles ont longtemps

été une référence opérationnelle pour les hydrologues pour la transformation de la pluie en débit, par le fait que ces modèles incorporent des hypothèses sur les mécanismes qui gouvernent le cycle hydrologique. En effet, il s'agit d'identifier les processus physiques du cycle hydrologique qui peuvent avoir lieu dans un bassin versant et attribuer à chacun d'eux une description analytique permettant la modélisation. Ce type de modèle s'est avéré très utile pour synthétiser l'information climato-hydrologique sur un bassin ; De plus, ils considèrent généralement le bassin versant comme étant un ensemble de réservoirs interconnectés, après quelques simplifications du cycle de l'eau. Un modèle hydrologique conceptuel tente de reproduire la réponse hydrologique d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation simplifiée de la situation réelle tant de la géométrie du bassin versant que de l'écoulement lui-même.

- g. Modèles globaux :** le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Ils présentent une structure très simplifiée, ils ne demandent pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. (Djelloul F., 2014)

II.2.5. Les variables d'un modèle hydrologique

Un modèle hydrologique est généralement défini par :

a. Variables d'entrée (variables indépendantes) :

il s'agit des entrées du modèle, qui sont essentiellement les chroniques de pluie, d'ETP ou de température.

b. Variables de sortie (variables dépendantes) :

il s'agit des sorties du modèle, qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques.

c. Variables d'état :

il s'agit des variables internes au système, qui évolue en fonction du temps et rendent compte de l'état du système à un moment donné, typiquement, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs (neige /production routage).

d. Paramètres :

les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo- signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié. (Djelloul F., 2014)

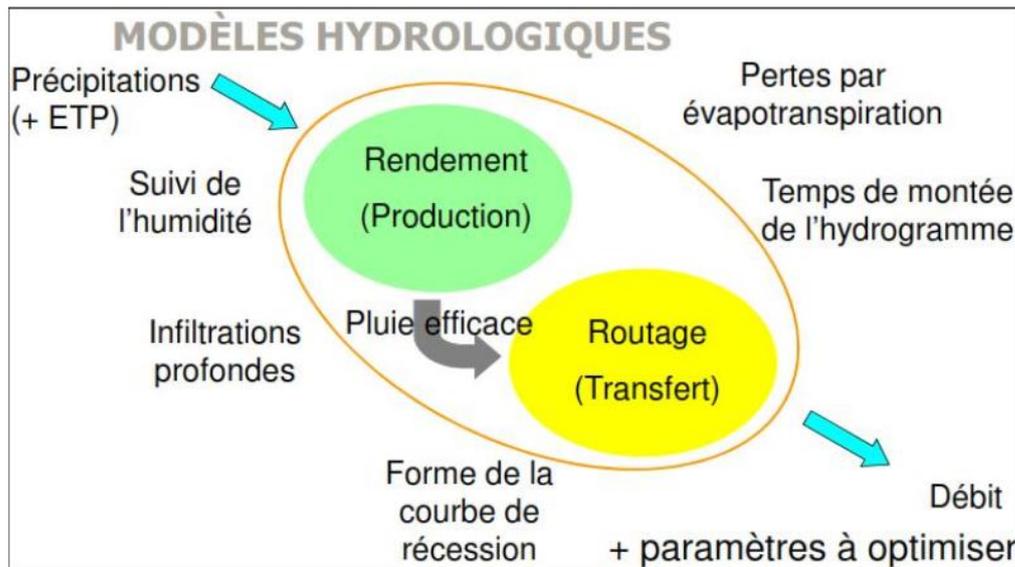


Figure 2.6 : Structure générale d'un modèle hydrologique.

(Source: Taibi., 2019)

II.2.6. Représentation de la relation pluie-débit

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant, et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on peut arriver à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme une transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique. Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais il demande une utilisation simple d'un nombre de paramètres limités souligne (Amiar S., 2014).

Une hypothèse qui est à la base de toutes les applications de la modélisation hydrologique, c'est la séparation des modèles pluie-débit en deux sous-modèles selon le schéma de la (fig. 2.7). Le premier sous-modèle, ou fonction de production, transforme les pluies brutes **PB** en pluies nettes **PN** après soustraction des pertes **W**. Ces pluies nettes **PN** engendrent les débits écoulés à l'exutoire au moyen de la fonction de transfert.

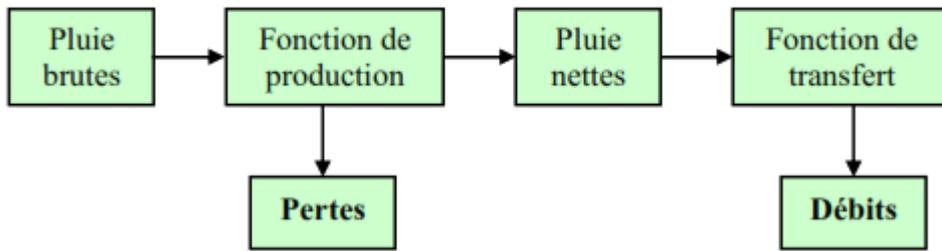


Figure 2.7: Décomposition d'un modèle pluie débit.

(Source: Cheloufi N .et Foual I., 2018)

II.2.6.1. Fonction de production :

La fonction de production transforme la pluie brute observée **PB** en pluie nette **PN**, en enlevant les pertes **W** (voir fig. 2.7). La pluie nette est la partie de la pluie brute qui arrive par ruissellement de surface à l'exutoire, les pertes **W** correspondent à l'infiltration dans les couches superficielles du sol aussi à l'interception par la végétation, à la reprise par évaporation.

Sur une parcelle, toute l'eau qui s'infiltré est considérée comme perdue **W** pour le ruissellement et toute l'eau qui ruisselle est supposée contribuer à la formation des crues, sur un bassin versant, il est possible de mesurer en différents points les termes du bilan hydrique, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leurs variabilité s'avère très difficile car la plupart des phénomènes ne sont pas continus. De plus certains processus physiques apparaissent sur un bassin versant alors qu'ils n'existaient pas à l'échelle de la parcelle.

II.2.6.2. Fonction de transfert :

Une fonction de production qui tient en compte toute la non-linéarité du processus pluie-débit, calcule les débits en considérant le système comme linéaire et invariant (fig. 2.7). (Cheloufi N. et Foual I., 2018)

II.2.7. Les étapes d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit

L'évaluation d'un modèle hydrologique passe par deux étapes avant d'aboutir à son exploitation :

a. Le calage :

Le modèle hydrologique adopté devra être calé afin d'identifier et de reconnaître certaines propriétés hydrologiques du bassin versant. En effet, la simplification de la réalité implique que certains, voire la totalité, des paramètres utilisés pour décrire le modèle, ne peuvent être reliés directement à des mesures de terrain, d'où la nécessité d'un calage. Ainsi, à partir de pluies, on déduit des estimations de débits que l'on compare aux débits observés, grâce à des critères

appelés fonctions objectif. Le calage s'effectue sur une période où la pluie, le débit et l'évapotranspiration potentielle doivent être connus. En général, on considère une période d'une à plusieurs années afin de caler nos paramètres pour l'ensemble des saisons, sur des événements très différents.

b. Le contrôle :

Une fois les paramètres estimés, on doit ensuite valider le modèle en s'assurant de ses "bonnes" estimations. On compare donc une deuxième fois les débits calculés aux débits observés, avec un critère qui peut être différent de la fonction objectif utilisée lors du calage. On apprécie alors la qualité du modèle sur des échantillons de données qui n'ont pas servi à sa construction. La période de contrôle choisie doit être différente de la période de calage, on évalue ainsi la fiabilité du modèle, on perçoit alors souvent que si le nombre de paramètres à caler est trop important, l'ajustement des simulations sur la réalité est très bon sur la période de calage, mais que le modèle se dégrade ensuite en période de contrôle, les erreurs comptées donnent une estimation des performances du modèle.

II.2.8. Les critères de calage d'un modèle hydrologique

L'estimation des performances d'un modèle hydrologique est l'une des tâches les plus importantes. Elle permet d'évaluer la qualité de la simulation, et nécessite donc la comparaison entre les débits observés et les débits simulés

Il existe une multitude de critères permettant d'évaluer la performance d'un modèle.

- **Critère d'erreur moyenne absolue**

Ce critère est donné par la formule suivante :

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

$Q_{obs,i}$: Débit observé pendant la période de calage ;

$Q_{cal,i}$: Débit calculé par le modèle ;

i : le pas de temps ;

n : nombre total de données au pas de temps considéré.

- **Critère quadratique**

Le critère quadratique (noté E) consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs entre les débits observés et les débits simulés.

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

- **Critère de la racine carrée de l'erreur moyenne (RMSE)**

C'est un indice important dans la modélisation conceptuelle au pas de temps mensuel, il est donné par :

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

- **Coefficient 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.

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

Q_{moy} : Moyenne des débits observés.

- **Critère de Nash**

Le critère de performance de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) est le plus utilisé en modélisation hydrologique. Il est basé sur la somme des erreurs quadratiques.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)})^2}$$

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.

II.2.9. Les modèles hydrologiques GR

Depuis plus de trente ans (30ans), l'équipe Hydrologie CEMAGREF (Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts) qui est actuellement d'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) ont développé les modèles hydrologiques connus sous le nom de «modèles GR» (Génie Rural). Les modèles GR (GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A) permettent de prédire au mieux les débits des cours d'eau sur une grande variété de bassins versants. Ils ont été développés avec un objectif d'efficacité et de robustesse, conduisant à des structures parcimonieuses et nécessitant peu de données d'entrée, et qui sont aisément disponibles, à savoir les précipitations, la température et les débits. Ces modèles permettent de travailler à différents pas de temps, mais aussi dans des contextes d'utilisations variés comme par exemple : l'évaluation de la ressource en eau, la prévision des crues et des étiages et les projections hydrologiques en climat futur. Chaque modèle a un certain nombre de paramètres à optimiser. Ce nombre est en général faible, ce qui permet d'éviter les problèmes liés à la sur paramétrisation et réduit considérablement les temps de calcul. Ce sont des modèles pluie-débit de type conceptuel et global, le terme « conceptuel » signifie qu'ils représentent le fonctionnement hydrologique des bassins versants avec une complexité limitée (évapotranspiration, ruissellement, pertes souterraines), sans prendre en compte les caractéristiques physiques des bassins versants. Le terme « global » signifie qu'ils peuvent être définis comme un modèle à une dimension qui intègre les processus hydrologiques sur les trois dimensions spatiales du bassin versant pour calculer un débit à son exutoire. C'est à dire à l'échelle du bassin versant. Ces modèles sont aussi appelés modèles à réservoirs, car le bassin est représenté comme un assemblage de réservoirs interconnectés décrits par des équations de bilan et des lois de vidange. Ils sont composés d'un module de production, assurant les bilans en eau (rapport stockage/évapotranspiration/écoulements) et d'un module de transfert, gérant la participation temporelle des écoulements sur le bassin .Cependant, ces modèles sont une représentation très simplifiée du fonctionnement réel du bassin et l'interconnexion des réservoirs et les lois de vidanges utilisées sont le plus souvent issues d'une approche empirique, car elles sont basées sur la relation existante entre les données d'entrée et de sortie de l'hydro système, explique (Perrin C et al ., 2007)

II.2.9.1. Principales caractéristiques des modèles GR

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une globalisation triple (triple considération de moyenne) du système bassin versant :

a. Au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus.

b. Au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;

c. Au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref. (Perrin C et al., 2007)

II.2.9.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :

La structure du modèle GR2M 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 C et al., 2007).

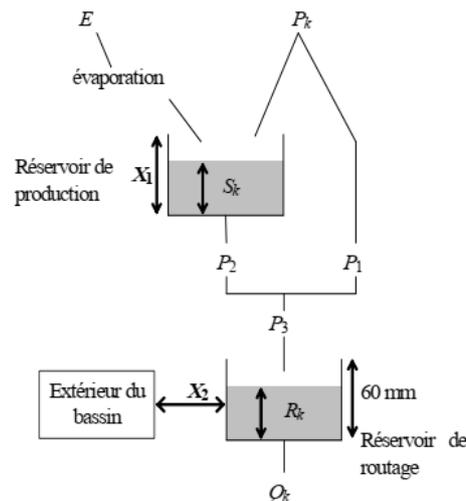


Figure 2.8: Schéma de la structure du modèle GR2M.

(Source: Perrin C et al., 2007)

1. La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}$$

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

$$P_1 = P - P_s'$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s$$

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s$$

2. Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\}$$

Et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

3. Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique : La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1).R'$$

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

$$R'' = X_2.R'$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k$$

4. Paramètres : Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

II.3. Application du modèle GR2M au bassin de la Chiffa

L'amélioration des outils de modélisation hydrologique est une thématique de recherche très active, elle s'évalue grâce au calcul de la performance des modèles pluie-débit, donc la capacité d'un modèle à reproduire des débits observés, qui s'estime à l'aide des critères de performances.

Dans ce travail nous avons évalué la capacité du modèle GR2M à reproduire les débits du bassin de la chiffa en utilisant le Programme R et le package airGR.

II.3.1. Modèle GR2M sous L'environnement R

Le logiciel R est à la fois un langage informatique et un environnement de travail : les commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont visualisés directement dans une fenêtre qui leur est propre. Ce logiciel a un certain nombre d'utilisation:

- Il sert à manipuler des données, à tracer des graphiques et à faire des analyses statistiques sur ces données
- Il permet l'utilisation des méthodes statistiques classiques à l'aide de fonctions prédéfinies ;
- Il permet de créer ses propres programmes dans un langage de programmation assez simple d'utilisation (proche de Matlab) ;
- Il permet d'utiliser des techniques statistiques innovantes et récentes à l'aide de package développés par les chercheurs et mis à disposition sur le site du CRAN.

Sa simplicité d'utilisation permet de programmer rapidement des algorithmes initialement dédié à la statistique, le langage R est maintenant suffisamment puissant et précis pour le calcul scientifique et l'ingénierie mathématique. Un grand nombre de fonctions, contenus dans différents packages, sont installés dans la version de base du logiciel R (Toudja A., 2017).

Le package AirGR, est un package R qui contient les modèles hydrologiques GR développés dans l'équipe d'Hydrologie des bassins versants de l'unité de recherche Hydro systèmes et Bioprocédés - HBAN du centre IRSTEA d'Antony (France). La version 1.0.5.12 contient ces modèles avec leurs structures d'origine.

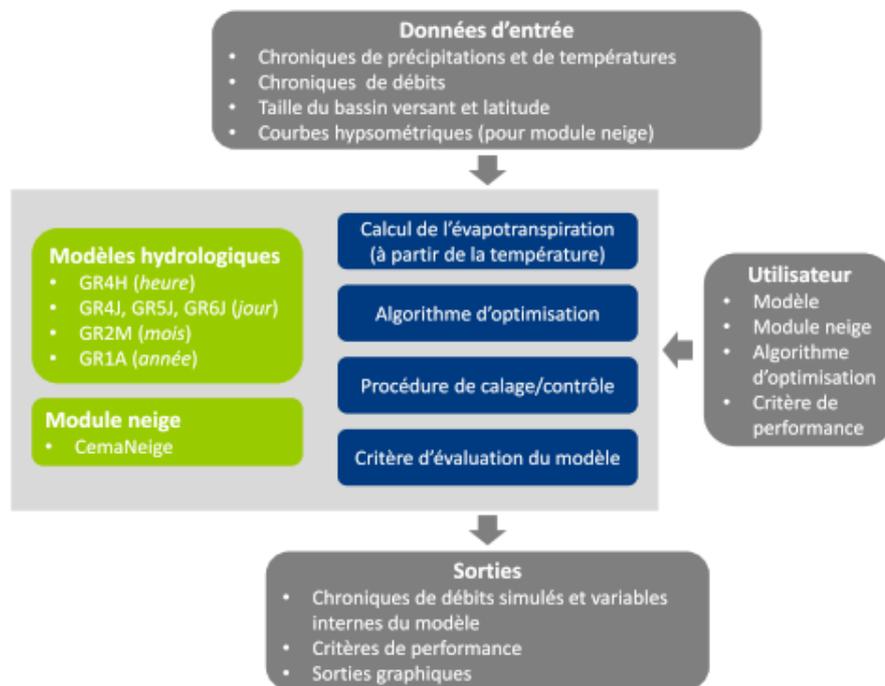


Figure 2.9 : Principaux éléments de package air GR.

(Source: Delaigue O et a., 2016)

Concernant le modèle GR2M, airGR permet de simuler la transformation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, à partir de séries chronologiques mensuelles de précipitations, d'évapotranspiration potentielle, de températures et des débits observés sur le bassin de la Chiffa.

Les sorties de ce package sont les séries de débits simulés au pas de temps mensuel, les critères numériques de performance ainsi que les sorties graphiques et les variables internes des modèles.

Le package comprend une procédure de calage et un jeu de critères d'évaluation de performance. Il est principalement basé sur trois familles de fonctions : modèles hydrologiques, critères d'évaluation et algorithme de calibration. (Mata E. S., 2017)

II.3.2. Calage et validation du modèle GR2M

➤ **Le calage du modèle :**

L'étape de calage consiste à déterminer les paramètres X_1 et X_2 du modèle qui contrôlent respectivement la fonction de production et la fonction de transfert. Le critère de Nash est utilisé pour évaluer la performance du modèle.

Le calage du modèle au cours de la période 1981-2000 montre une représentation satisfaisante des débits observés (fig 2.10). Le critère de Nash est d'environ 77,56%, ce qui permet de passer à la validation du modèle (tableau II.5).

Tableau 2.5 : résultats de la modélisation pour la période de calage

Période de calage	X1 (mm)	X2	Nash
Janvier 1981-Décembre 2000	347.234	0.682	77.56%

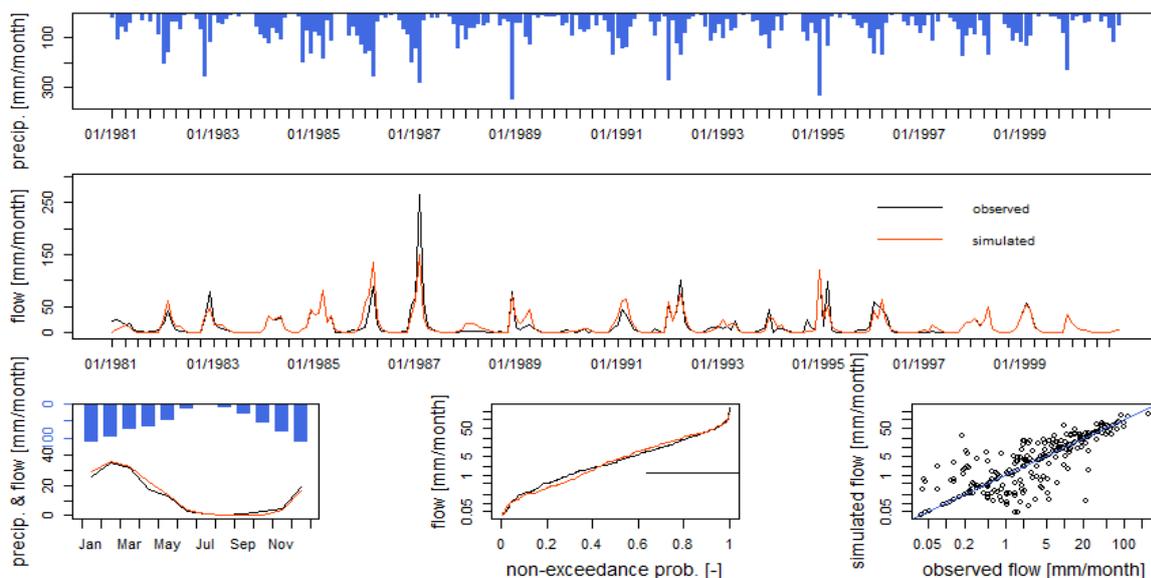


Figure 2.10 : résultat du calage du modèle GR2M sur le bassin de la Chiffa

➤ Le Validation du modèle :

L'étape de validation consiste à vérifier que le modèle garde toujours sa performance en passant à une période indépendante de la période de calage tout en gardant les mêmes paramètres de calage X1 et X2.

La validation du modèle au cours de la période Janvier 2002-Décembre 2012 montre un critère de Nash de 99 % (tableau II.6). Les performances du modèle sont encore meilleures que la période de calage. Le modèle reproduit parfaitement les débits à partir des précipitations et l'évapotranspiration observée sur le bassin de la Chiffa (fig 2.11).

Tableau 2.6 : résultats de la modélisation pour la période de validation

Période de validation	X1 (mm)	X2	Nash
Janvier 2002-Décembre 2012	347.234	0.682	99 %

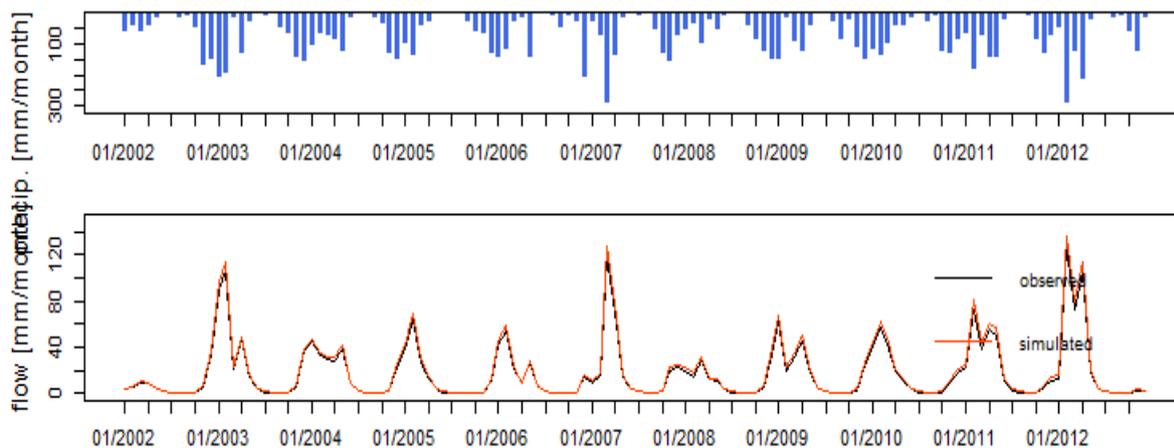


Figure 2.11 : résultat de la validation du modèle GR2M sur le bassin de la Chiffa

Conclusion :

La modélisation hydrologique joue un rôle important dans l'évaluation des ressources en eau. Cette modélisation décrit les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés applicables à l'échelle du bassin versant, Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages, pour lesquelles le Cemagref développe des méthodologies spécifiques de mise en œuvre.

L'évaluation des performances du modèle GR2M sur le bassin de la Chiffa a montré que celui-ci était capable de reproduire convenablement la réponse hydrologique au sein du bassin, ce qui nous a permis de déterminer les paramètres X1 et X2 spécifique au bassin de la Chiffa. Ces mêmes paramètres seront utilisés afin de simuler l'évolution future des écoulements au sein du bassin. Pour cela nous aurons besoin des simulations des pluies, des températures et des évapotranspirations mensuelles futures, d'où la nécessité d'utiliser des modèles climatiques.

Chapitre 3

*Les modèles climatiques régionaux et leur
application au bassin de la Chiffa*

Chapitre III: Les modèles climatiques régionaux et leur application sur le bassin de la Chiffa

Introduction

La compréhension croisée du climat passé et du climat actuel permet d'élaborer des équations pour construire des outils de représentation simplifiés de tout ces processus ; l'étude d'impact du changement climatique se base sur deux étapes :

- La production des données climatiques du futur (appelées projections) simulées par un ensemble de modèles climatiques globaux de grande échelle (avec des mailles entre 150 et 300 kilomètres) en fonction de certains scénarios d'émissions ;
- La deuxième étape, indispensable avant l'utilisation de ces données climatiques pour des études d'impact, est celle de leur régionalisation.

Sur ce point dans cette partie nous présentons un état de l'art sur les modèles climatiques et les différents types qui existent, incluant aussi les modèles régionaux CORDEX Africa.

III.1. Généralités sur les modèles climatiques

III.1.1. Définition d'un modèle climatique

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

L'amélioration des modèles climatiques est poursuivie grâce à deux facteurs :

- ✓ les recherches scientifiques fournissent une meilleure compréhension de la dynamique de couches terrestres ;
- ✓ la puissance de calcul numérique croît.

[\(https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-modele-climatique-12896/\)](https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-modele-climatique-12896/)

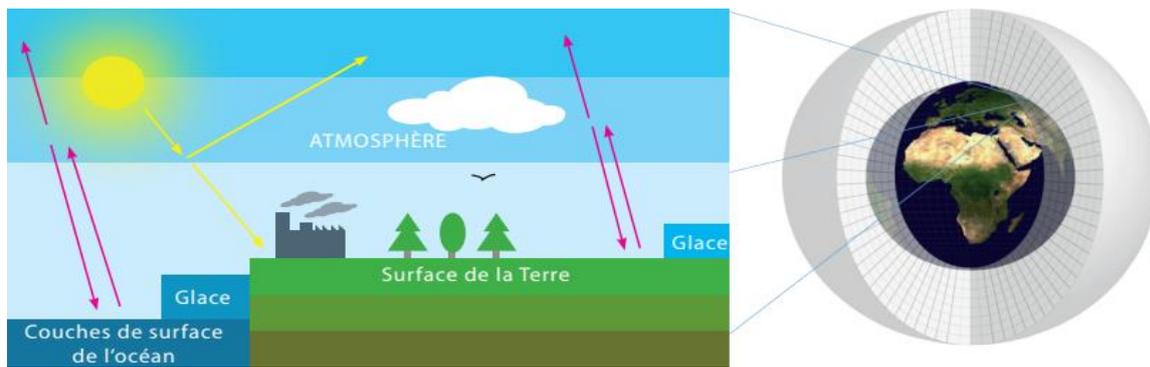


Figure 3.1 : Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite).

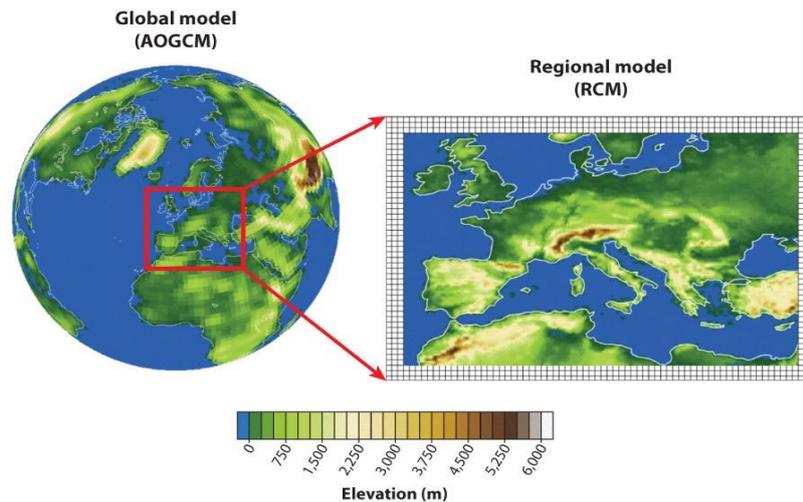
(Source: Charron I, 2016)

Afin de prendre une représentation précise, l'équation doit être résolue pour chaque point de l'atmosphère, des océans et des couches supérieures du sol, ce qui est impossible en pratique. Pour atténuer cette problématique, les composantes du système climatique sont divisées en boîtes distinctes ou cellules (points) de grille qui recouvrent la planète. La taille des cellules de grille, tant horizontale que verticale, détermine la résolution du modèle. Ainsi, un modèle climatique physique est un simulateur qui comprend un code informatique pour fournir une représentation discrète (c.-à-d. sur une grille) dans l'espace et dans le temps des équations fondamentales de la mécanique des fluides résolues au moyen d'un schéma numérique. De nombreux modèles climatiques ont été développés par autres centres de climatologie dans le monde, les modèles varient selon plusieurs facteurs, comme le choix du schéma numérique, le degré de simplification, la grille aussi la façon de représenter les phénomènes physiques qui se produisent à des échelles plus fines que celles résolues directement par les équations fondamentales (paramétrages). De plus, une différence importante entre les modèles dérive des champs géophysiques utilisés pour représenter les textures du sol et les types de végétation, ainsi que la topographie et la concentration d'émissions des GES sont essentiels comme intrants dans les modèles climatiques. Ces diversités impliquent que chaque modèle est unique et va engendrer un résultat légèrement différent avec les mêmes données de forçage. (Charron I., 2016).

III.1.2. Les types de modèles climatiques

Il existe deux grands types de modèles climatiques. Les modèles de circulation générale (GCM ou modèles globaux) et les modèles climatiques régionaux (RCM). Les premiers amènent la possibilité de simuler le climat de la planète entière alors que les deuxièmes ne simulent qu'une partie du globe. Les GCM sont très utilisés dans l'étude du changement climatique et permettent

ainsi de faire des projections climatiques sur plusieurs centaines d'années avec différents scénarios d'émission. Bien qu'utiles dans ce type d'applications, ils n'offrent pas la possibilité d'étudier correctement les climats régionaux. En effet, leur résolution temporelle et spatiale (de l'ordre de la centaine de kilomètres) grossières ne accède pas de prendre en compte les phénomènes de petites échelles. Les RCM, avec leur résolution bien plus fine (10 Km), sont quant à eux capables de résoudre les phénomènes négligés ou fortement paramétrés par les GCM. (Prignon M., 2016)



 Giorgi F, Gutowski Jr WJ. 2015. Annu. Rev. Environ. Resour. 40:467–90

Figure 3.2 : Vue schématique de la technique de régionalisation.

(Source : Prignon M, 2016)

III.1.2.1. Modèles climatiques globaux (MCG)

Un modèle climatique global peut couvrir l'ensemble du globe, il utilise des mailles de taille proportionnellement grossière (supérieure à 100 km). La résolution (la taille du pixel) de ce type de modèle induit une représentation trop grossière du relief, des côtes mais aussi de l'occupation des sols. Ceci limite les études des événements extrêmes, les études d'impact et de stratégies d'adaptation raccordées aux changements climatiques.

Les MCG sont décomposés en trois catégories principales, de la toute première génération ils ont été appelés modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA), et incluaient seulement la partie atmosphérique du système climatique et l'interaction avec la surface terrestre continentale. La deuxième génération de modèles de circulation générale surnommée atmosphère océan (MCGAO), couplait l'atmosphère et la terre avec des modèles physiques de l'océan. La dernière génération de modèles, appelés modèles de système terrestre (MST), inclut maintenant

l'ajout d'autres interactions et les cycles biogéochimiques, ainsi que les changements de la couverture terrestre. (Charron I., 2016)

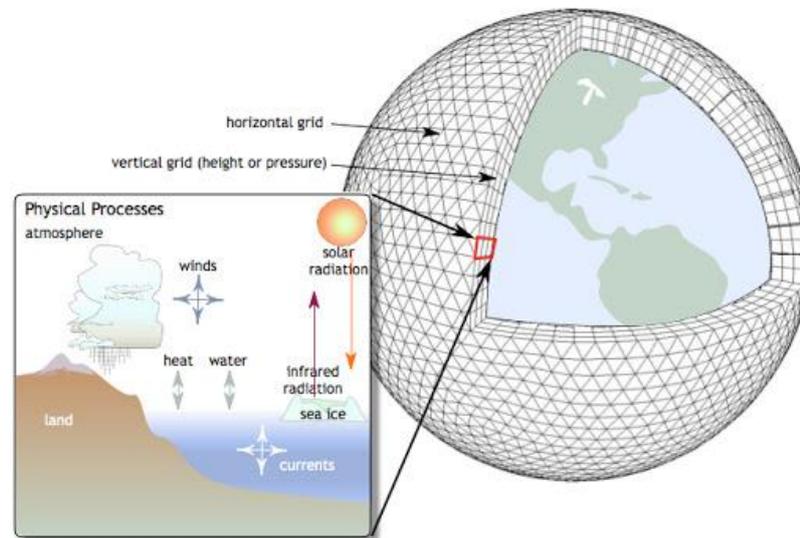


Figure 3.3 : modèle climatique global.

(Source: https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_circulation_g%C3%A9n%C3%A9rale)

III.1.2.2. Modèles climatiques régionaux (MCR)

Bien que les MCG soient des outils prédictifs précieux, ils ne peuvent pas tenir compte de l'hétérogénéité à la variabilité et les changements climatiques en raison de leur résolution grossière. De nombreuses caractéristiques du paysage telles que montagnes, plans d'eau, infrastructures, caractéristiques de la couverture terrestre et composantes du climat les systèmes tels que les nuages convectifs et les brises côtières ont des échelles beaucoup plus fines que 100–500 kilomètres. Ces hétérogénéités sont importantes pour les décideurs qui ont besoin d'informations sur impacts potentiels sur la production végétale, l'hydrologie, la répartition des espèces, etc à des échelles de 10 à 50 kilomètres.

Diverses méthodes ont été développées pour combler le fossé entre ce que les GCM peuvent offrir et ce que la société / les entreprises / les parties prenantes ont besoin pour la prise de décision. Les informations sont basées sur l'hypothèse que le climat local est conditionné par des interactions entre caractéristiques atmosphériques à grande échelle (circulation, température, humidité, etc.) et caractéristiques locales (plans d'eau, chaînes de montagnes, propriétés des surfaces terrestres, etc.) il est possible de modéliser ces interactions et établir des relations entre le climat local actuel et les conditions atmosphériques à travers le processus de réduction d'échelle. Il est important de comprendre que le processus de réduction d'échelle ajoute des

informations aux sorties de GCM grossière pour que les informations soient plus réalistes à une échelle plus fine. (Caffrey P. et Farmer A, 2014)

La figure suivante présente une représentation visuelle du concept de réduction d'échelle :

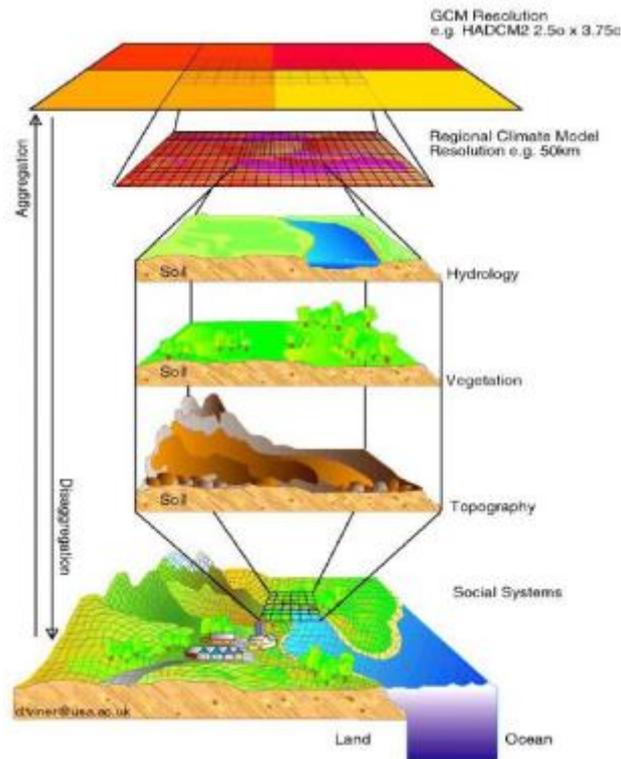


Figure 3.4 : Principe de la réduction d'échelle (Technique downscaling)

(Source : Caffrey P. et Farmer A, 2014)

Pour pouvoir bien décrire le relief, il est éclairé d'utiliser un modèle climatique couvrant uniquement une région, en utilisant une maille de taille fine (inférieure à 20 km). Il s'agit d'un modèle du climat régional réalisé par la technique du downscaling qui définit un passage d'un MCG (200x200Km) à un MCR (50x50Km, 25x25Km, 12x12km). Ces modèles sont des outils de désagrégation des champs géophysiques, résolvant les équations de la thermodynamique atmosphérique dans le but de simuler à des échelles fines des champs surfaciques tel que la pluviométrie. Lorsqu'un climat régional est utilisé pour raffiner spatialement les simulations issues d'un modèle de climat global, on parle alors de désagrégation dynamique. Il s'agit en quelque sorte d'un « zoom » sur une région particulière. C'est ce que représente schématiquement (fig .3.5). Elle illustre le guidage par le modèle climatique global (à droite) du modèle climatique régional (à gauche). Le modèle climatique global fournit l'évolution de l'état de l'atmosphère à grande échelle (vent, température, pression, humidité), ce qui indique que les fluctuations de fines échelles (inférieures à 100 km) sont absentes.

Le guidage consiste à contraindre le modèle climatique régional à ne pas s'écarter de la trajectoire imposée par le modèle climatique global. Cette trajectoire est en pratique l'évolution de l'état atmosphérique de grande échelle. Ce guidage s'interprète mathématiquement par l'ajout d'un terme dit « de relaxation » dans les équations d'évolution du vent, de la température, de l'humidité. (Drobinski P, 2015)

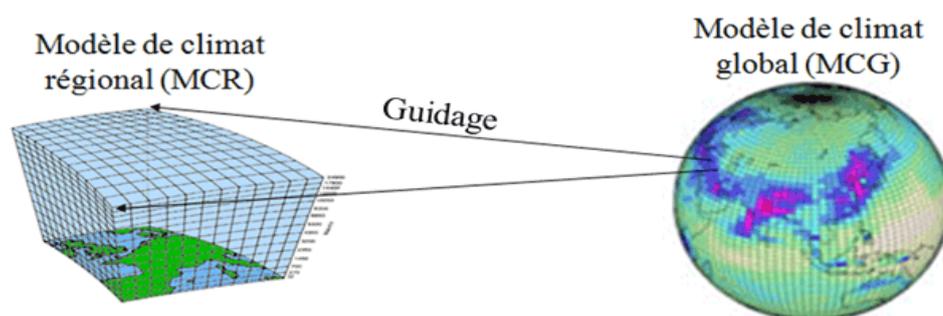


Figure 3.5: Schema illustrant la problématique de guidage d'un modèle climatique régional par un modèle climatique global.

(Source: Drobinski P, 2015)

III.1.3. Scénarios d'émissions

Pour étudier l'évolution du climat et affiner les simulations des modèles climatiques, des scénarios socio-économiques sont donc pris en compte. Ces derniers dépendent des modes de production et de consommation des sociétés à court, moyen et long terme. Pour construire ces scénarios à l'aide de modèles d'impact intégrés qui simulent aussi de manière simplifiée la chimie de l'atmosphère, il est nécessaire de faire des hypothèses sur le développement économique dans les différents pays ; à partir d'analyses prospectives, l'évolution de la démographie, de l'économie, de l'industrie, de l'agriculture, etc et anticipées pour les horizons futurs. Cet exercice est primordial puisque la communauté scientifique dans sa grande majorité considère que les activités anthropiques contribuent au réchauffement climatique.

Il existe plusieurs générations de scénarios d'émissions qui ont été produites en fonction de l'avancée des connaissances. Pour les deux premiers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Pour le 3^{ème} et le 4^{ème} rapport, les SRES (Special Report on Emissions Scenario) se déclinaient en 4 familles (A1, A2, B1, B2). La famille A1 se divisait en trois groupes qui se distinguaient par leur accent technologique :

forte intensité de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B). Pour le 5^{ème} rapport publié en 2013, les SRES ont été remplacés par les RCP (Representative Concentration Pathway). Quatre scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif, relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère au cours du 21^{ème} siècle, existent désormais : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5. Le premier implique une réduction d'émissions de GES par la communauté internationale (scénario optimiste), tandis que le dernier correspond à l'évolution des émissions actuelles jusqu'à la fin du siècle si rien n'est fait pour les réduire (scénario pessimiste). Les scénarios RCP 4.5 et 6.0 sont des scénarios intermédiaires. Les trajectoires des RCP sont assez proches jusqu'en 2040, puis divergent assez fortement à partir de 2050. L'incertitude sur le climat futur selon les scénarios est surtout significative dans la seconde partie du 21^{ème} siècle. Dans la première partie, les sorties de modèles tous scénarios confondus apportent des réponses qui convergent de manière relative. Le forçage radiatif et la concentration (en partie par million) varient selon la trajectoire de chaque scénario. Ces trajectoires dépendront des politiques énergétiques mises en œuvre dans les pays pour lutter contre le changement climatique à l'échelle locale et globale. (<http://www.grec-sud.fr/article-cahier/articles-du-cahier-climat/perspectives-futures/quelles-options-pour-la-transition/>)

Le forçage radiatif représente le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (9 à 16 km d'altitude) ou de l'atmosphère, dû à un changement des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre. Le forçage radiatif est exprimé en watt par mètre carré (W/m^2). Sa valeur pour les gaz à effet de serre dus aux activités humaines était de $2,90 W/m^2$ en 2013. Les RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6 sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300.

RCP 2.6 : Très faibles émissions (peu réaliste)

RCP 4.5 & RCP 6.0 : Scénarios de stabilisation (optimiste)

RCP 8.5 : Très fortes émissions GCM Modèles générale de circulation (ou modèles de climats du globe). (Charron I, 2016)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Anomalie de T (°C)	Trajectoire	SRES équivalent (anomalie de T)
RCP 8.5	8.5 W/m ² en 2100	>1370	4.9	Croissante	SRES A1FI*
RCP 6.0	6 W/m ² après 2100	~850	3.0	Stabilisation sans dépassement	SRES B2
RCP 4.5	4.5 W/m ² après 2100	~650	2.4	Stabilisation sans dépassement	SRES B1
RCP 2.6 (RCP 3PD)	Pic à 3W/m ² en 2050, puis déclin à 2.6Wm ² avant 2100	~490	1.5	Pic puis déclin	Aucun

Figure 3.6 : Caractéristiques des scénarios RCP. (Source: Charron I, 2016)

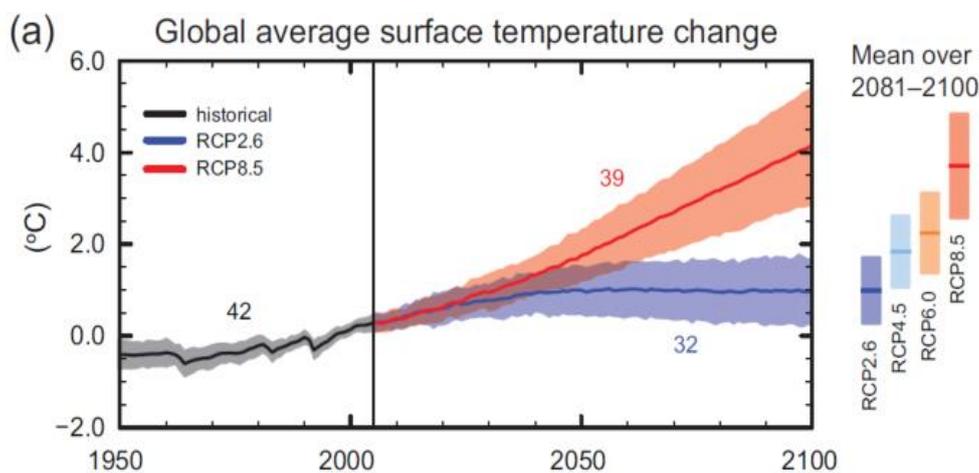


Figure 3.7 : Projection des températures.

(Source: Freya B, 2013)

III.1.4. Simulations climatiques

Les simulations climatiques sont le produit final des modèles climatiques. Elles correspondent au résultat de l'exécution d'un modèle climatique pendant une certaine durée. Pour obtenir une simulation climatique, de nombreuses données sont nécessaires en intrants dans un modèle climatique. En outre, les scénarios d'émissions sont un facteur principal pour les modèles climatiques dans les études sur les changements climatiques. Différentes simulations climatiques sont acquises puisque chaque modèle climatique réagit différemment aux scénarios d'émissions de GES, et produira un climat futur différent. Chaque simulation est calculée de façon fréquentative pour des intervalles de temps divers, ces intervalles, nommées « pas de temps », une simulation climatique contient des variables climatiques descriptives (température, vents, pression barométrique, précipitations, neige, etc) qui devraient toutes être physiquement cohérentes entre elles. (Charron I, 2016)

La durée d'une simulation peut varier de quelques années à des milliers d'années; à la fois pour le passé et le futur (fig.3.8). La longueur de temps sur laquelle les modèles climatiques sont exécutés pour produire des simulations diffère d'un centre climatique à un autre, mais peut aller par exemple de 1850 ou de 1900 à 2100 ou même 2300.

Les modèles climatiques se révèlent être des outils importants pour quantifier les changements de climat attendus et consécutifs aux modifications de la composition atmosphérique (par exemple, la concentration de gaz à effet de serre), ce qui est nécessaire pour :

- interpréter, d'une manière correcte, les changements climatiques observés;
- calculer la sensibilité du climat à ces changements;
- mieux comprendre les processus et les phénomènes qui se produisent dans notre système climatique.

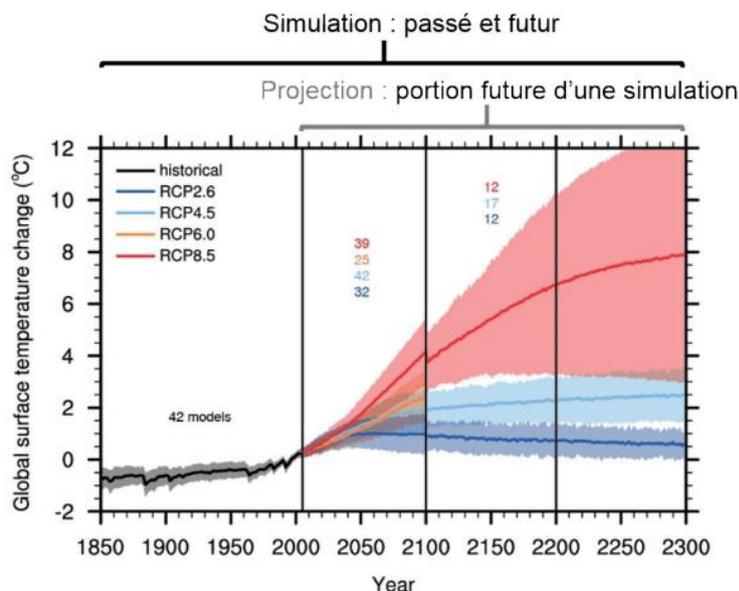


Figure 3.8 : Séries temporelles des anomalies de la moyenne annuelle mondiale de la température de l'air en surface.

(Source: Charron I, 2016)

III.1.5. Les sources d'incertitudes dans les projections climatiques

L'incertitude des projections climatiques dérive de trois sources :

- a) la variabilité naturelle du climat ;
- b) les imprécisions des modèles climatiques ;
- c) les émissions de GES.

L'importance relative des sources d'incertitude dépend de la période considérée, la variabilité naturelle du climat est la source d'incertitude car cette variabilité peut s'opposer, au moins pendant quelques décennies, aux tendances à long terme qui sont associées au changement climatique anthropique. À court terme, le choix du scénario d'émissions est peu important. Il s'écoule environ 30 ans avant qu'une quelconque différence entre les scénarios d'émissions ait un effet important sur le climat.

Par conséquent, l'incertitude dans les projections climatiques ne doit pas être vue comme un obstacle à la prise de décision sur une échelle temporelle plus longue. Il est donc important de concevoir que les principales sources d'incertitude et leur importance modifieront au fil du temps afin de modérer l'importance des différentes sources d'incertitude ce qui aura également une grande influence sur le type d'information climatique qui serait le plus approprié. Sur un horizon de planification à court terme, les décideurs peuvent accorder une plus grande importance à la variabilité des observations sur la zone d'étude, tout en gardant que le signal de changement climatique sous-jacent est tout de même pertinent.

Par contre, pour des horizons de planification plus longs, les incertitudes jointes au scénario d'émissions doivent recueillir une attention particulière. Sur ces horizons, le signal de changement climatique est plus fort que la variabilité climatique, mais il est fortement influencé par le scénario d'émissions porté. Étant donné le haut niveau d'incertitude associé à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre anthropiques, les décisions doivent tenir compte de tous les futurs possibles.

Comme discuté plus tôt, les modèles climatiques (MCG et MCR) sont des représentations mathématiques du monde réel et comportent un biais, une erreur systématique dans leur estimation des variables climatiques. Ceci est une des essentielles raisons qui expliquent pourquoi les sorties de modèles ne doivent pas être comparées directement aux observations. Ces biais principaux sont liés à une mauvaise représentation de la terminaison des événements.

Le biais d'un modèle n'est généralement pas une difficulté lorsqu'on calcule les changements relatifs entre un horizon futur et la période de référence à partir de la même simulation. En effet, on préjuge que le biais dans le modèle est identique pour les deux périodes et donc qu'il disparaît lorsqu'on calcule le changement relatif, c'est-à-dire un delta, entre la période de référence simulée et le futur simulé. La mesure de cette erreur est nécessaire pour l'évolution des modèles climatique il est donné sous la formule suivante :

$$\text{Biais} = \frac{\bar{P}_{sim} - \bar{P}_{Obs}}{\bar{P}_{Obs}}$$

Ou

P_{sim} : Précipitation simulée

P_{obs} : Précipitation observée

Cependant, lorsqu'on calcule des valeurs simulées futures, autrement lorsqu'on applique aux observations le changement projeté par le modèle, les biais deviennent importants et doivent être corrigés. Ceci est principalement nécessaire pour le calcul de seuils, qui sont très sensibles à un petit changement, à titre d'exemple, si un modèle a un biais chaud par rapport aux observations, la probabilité d'atteindre un seuil de température chaude sera augmentée dans les données simulées par rapport au monde réel. Par conséquent, si le biais n'est pas corrigé, un décideur peut conclure qu'à l'avenir il y aura plus de jours avec une température moyenne supérieure. Il est primordiale de se rappeler que les techniques de correction sont souvent utilisées pour éliminer une partie du biais dans les simulations climatiques afin d'avoir une meilleure confiance entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Cependant, cette corrélation n'est jamais parfaite et les scénarios climatiques doivent quand même être calculés en utilisant les valeurs simulées pour le futur et la période de référence, même si les biais des simulations ont été corrigés. (Charron I., 2016)

III.2. Les modèles climatiques régionaux CORDEX -Afrique

Ces dernières années, il y a eu un intérêt international pour l'étude du climat en Afrique et en particulier les mécanismes expliquant la répartition géographique et la variabilité temporelle des précipitations. Cela est accessible car l'Afrique n'est pas seulement une région exceptionnellement vulnérable au changement climatique «en raison de la gamme des impacts prévus et de la faible capacité d'adaptation» (GIEC AR4., 2007) mais aussi des niveaux actuels de variabilité météorologique.

Plus récemment, une dramatique sécheresse a provoqué une crise humanitaire touchant 13 millions de personnes dans la région de la Corne de l'Afrique. Dernier point mais non le moindre, il est devenu apparent à partir du GIEC AR4. (2007) que les modèles climatiques ont des difficultés à simuler des éléments clés du climat actuel pour ce continent et qu'il est donc nécessaire d'approfondir la conception des interactions multiples entre les composants du climat

africain afin d'améliorer les simulations et projections climatiques pour cette région du monde. (Hernandez-diaz L et al ., 2012) .

Au lancement du projet CORDEX, il fut décidé de ne commencer qu'avec une seule région afin d'éprouver les méthodes mises en place. L'Afrique fut alors montrée pour lancer le projet. Deux raisons principales ont justifié ce choix:

- **La vulnérabilité** importante de l'Afrique face au changement climatique. En effet, des secteurs comme l'agriculture, la gestion de l'eau ou la santé publique sont aujourd'hui très délicates au climat en Afrique.
- **L'insuffisance** à l'époque, de simulations du climat en Afrique réalisées par des RCM. En regroupant ainsi un grand ensemble de simulations conduites par différents RCM sur même domaine d'intégration, il est faisable premièrement, de comparer les sorties des différents RCM entre elles et deuxièmement, de faciliter les analyses du climat en Afrique.

Le projet est maintenant lancé depuis quelques années, un protocole a été mis en place dans la foulée du projet CORDEX. Ce dernier a pour but d'apporter plus d'informations sur le changement climatique grâce aux RCM.

Cette expérience sert à élaborer un système accessible à un nombre de scientifiques et d'optimiser l'emploi des résultats. C'est pourquoi les domaines CORDEX comprennent la majorité des régions du monde. Afin d'assurer une large participation, l'équipe spéciale sur la réduction d'échelle des prévisions climatologiques au niveau régional.

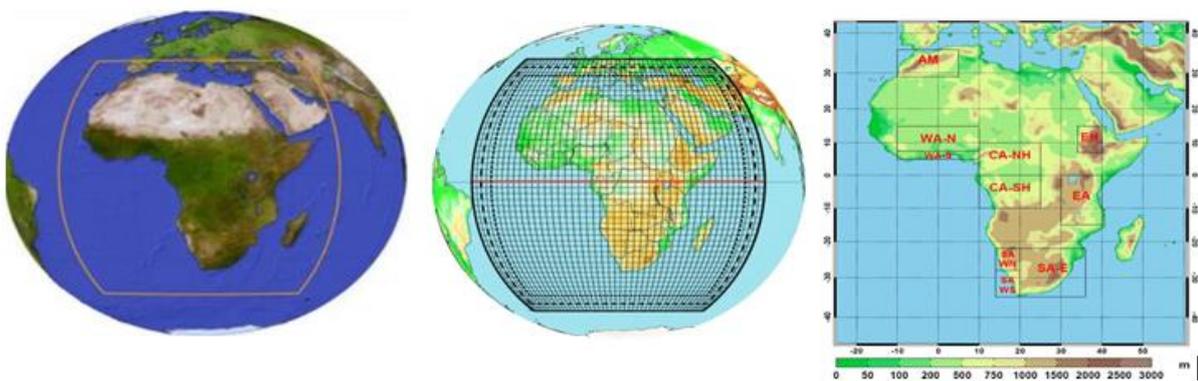


Figure 3.9 : Domaine d'application de CORDEX-Afrique.

(Source: Prignon M, 2016)

L'expérience CORDEX a pour objectif de fournir un cadre d'évaluation et de vérification de l'efficacité des modèles et concevoir une série d'expériences destinées à prendre des projections

climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation ; On peut en voir le schéma (fig.3.10).

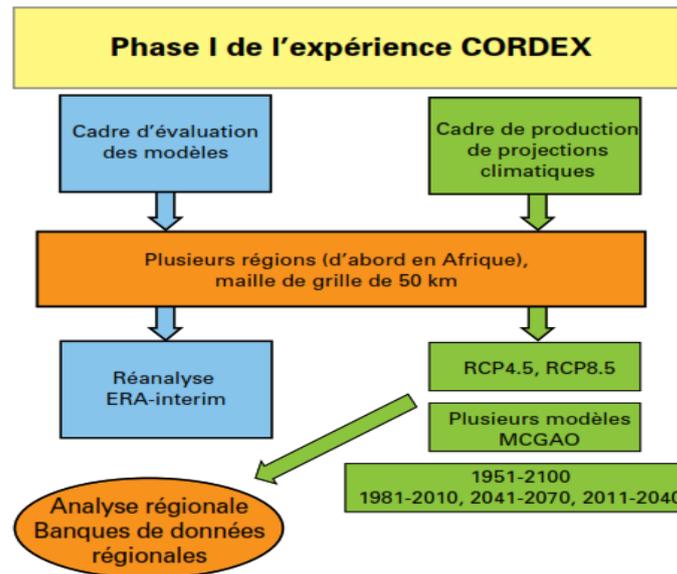


Figure 3.10 : Schéma de la première phase de l'expérience CORDEX.

(Source: Giorgi F et al, 2009)

Les modèles climatiques régionaux développés dans le cadre du programme Cordex-Africa sont les suivants :

- **RCA4 :**

C'est un modèle atmosphérique régional du Centre Rossby sera utilisé pour la réduction d'échelle à venir pour CORDEX en utilisant les MCG CMIP5 comme conditions aux limites.

- **HIRHAM :**

C'est un modèle climatique atmosphérique régional (RCM) basé sur un sous ensemble des modèles HIRLAM (Undén et al, 2002) et ECHAM (Roekner et al, 2003), combinant la dynamique du premier modèle avec les schémas de paramétrisation physique de ce dernier.

- **CCLM4 :**

C'est un modèle climatique régional non hydrostatique développé à partir du Modèle Local (LM) du Service Météorologique Allemand par la Communauté CLM. Le modèle a été utilisé pour des

simulations sur des échelles de temps allant jusqu'à des siècles et des résolutions spatiales entre 1 et 50 km.

- **RACMO :**

Le KNMI a été développé, en coopération avec l'Institut météorologique danois, le modèle de recherche RACMO basé sur le modèle numérique de prévision météorologique à haute résolution (HIRLAM). (Zeghoud F.Z.,2018).

Tableau 3.1 : Modèles climatiques régionaux-CORDEX avec les modèles globaux associés

N	Modèle climatique régional (MCR)	Nom abrégé du modèle (MRC)	Modèle climatique global MCG
1	CLMcom COSMO-CLM (CCLM4)	CCLM4	MPI ICHEC CNRM
2	DMI HIRHAM5	HIRHAM5	ICHEC
3	SMHI Rossby Center Regional Atmospheric Model (RCA4)	RCA4	MPI ICHEC CNRM
4	KNIMI regional Atmospheric climate model, version 2.2 (RACMO2.2T)	RACMO22T	ICHEC

III.3. Les méthodes de correction des sorties de MCR

D'une manière générale, les projections régionalisées ne peuvent être utilisées directement à des fins d'études d'impact à l'échelle locale car elles sont biaisées par rapport aux observations et leur échelle spatiale est trop grossière pour autres applications.

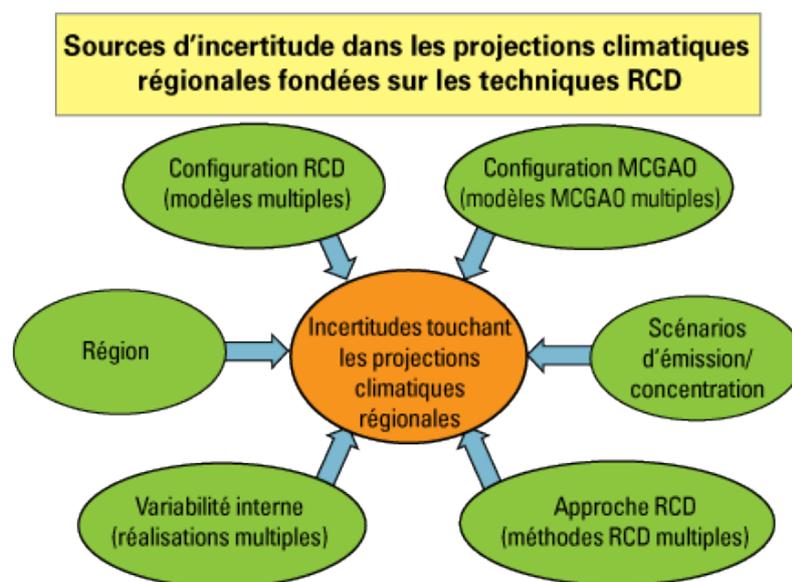


Figure 3.11 : Schéma des principales incertitudes touchant les projections climatiques régionales. (Source: Giorgi F et al ., 2009)

Les simulations effectuées avec un modèle donnée sont imprécises pour chacune des variables de sortie des modèles, qui peut être comparée à des observations, cette imperfection se traduit par une erreur variable dans le temps (Hingray B et al ., 2014) qui peut être réduite en corrigeant les biais des modèles dont (fig.3.11) représente l'ensemble des incertitudes qui touche la projection climatique.

Une correction de biais est généralement accomplie sur les sorties des modèles climatiques par l'ensemble des études d'impacts du changement climatique. Cette correction est un variée et corrige chaque variable d'intérêt indépendamment des autres (Jie C et al., 2017). Il existe distinctes sortes de techniques de correction de biais et de descente d'échelle statistiques, exposant des caractéristiques différentes pour répondre aux besoins différents d'utilisateurs finaux. Dans cette partie nous présentons deux méthodes de corrections de biais ; la méthode de Delta et la méthode Quantile-Quantile.

III.3.1.Méthode du Delta

La méthode des deltas reste encore la procédure la plus populaire pour générer des scénarios climatiques à l'échelle locale ou pour une région d'intérêt. On considère d'abord une climatologie de référence selon l'application considérée, cette climatologie peut-être représentative de moyenne à long-terme où les enregistrements météorologiques sont à l'échelle quotidienne. Le changement moyen ou delta correspondant à un point de grille du MCG proche du site d'intérêt est ensuite calculé en considérant la différence des moyennes (généralement sur une base mensuelle) des valeurs de la variable considérée entre une projection future et la climatologie de référence. Cette différence est ensuite ajoutée aux observations quotidiennes du mois considéré à la station considérée et sur la période de référence. (Bokoye A., 2007).

Méthode du Delta représente la différence entre la valeur future et celle de la période de référence d'une variable climatique telle que simulée par un model climatique (fig.3.12)

$$\text{Futur} = \text{climat observé} + \frac{(\text{climat projection futur} - \text{climat simulation présent})}{\text{Anomalie}}$$

Ou

$$\text{Futur} = \text{climat observé} * \frac{(\text{climat projection futur} / \text{climat simulation présent})}{\text{Anomalie}}$$

L'anomalie correspond à la différence entre l'état moyen actuel et l'état moyen futur simulé par le modèle climatique (Huard F., 2013).

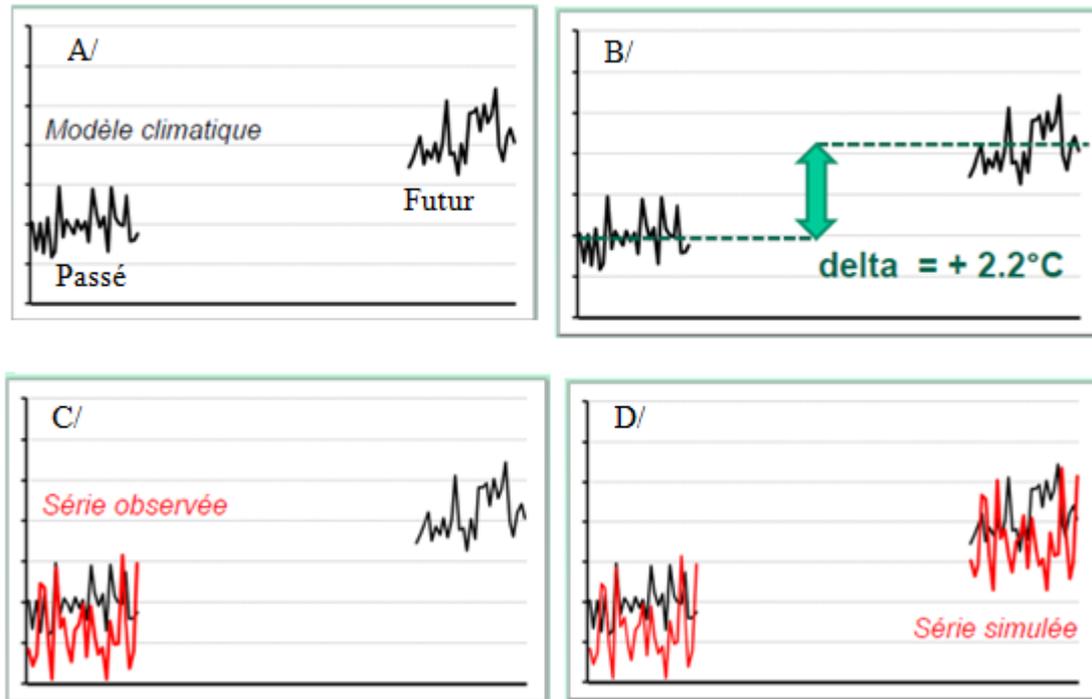


Figure 3.12 : Exemple de la méthode de correction delta. Le changement relatif entre la période de référence et la période future est calculé (B) et appliqué à la série temporelle observée (D).

➤ **Avantages :**

- Mise en œuvre relativement rapide du fait de la disponibilité des données de simulations (modèle climatique + scénarios d'émission) associés à plusieurs MCG ;
- Possibilité de générer des scénarios sur de longues périodes de l'ordre de 100 ans.

➤ **Faiblesses :**

- L'hypothèse selon laquelle les biais du MCG calculé pour la période de référence sont les mêmes que pour le futur ;
- La distribution spatiale du climat de référence est supposée constante dans le futur ;
- La variabilité climatique et la distribution statistique de la variable considérée restent inchangées (i.e. identiques à la période de référence).

III.3.2. méthode quantile-quantile

Les méthodes de correction de biais sont basées sur la comparaison entre les données simulées et observées sur une période passée. L'écart entre les deux est considéré comme le biais ou l'erreur du modèle. Ainsi, la correction est estimée sur une période observée et la même correction est appliquée aux données des simulations de la période future. Ceci implique une forte hypothèse sur la stationnarité du biais entre la période présente et la période future. La méthode de

correction de biais directe consiste à corriger les précipitations par l'écart ou le rapport entre des précipitations moyennes simulées et observées sur une même période, puis le même écart ou rapport est appliqué dans les précipitations du futur. Cette méthode est la plus simple, mais elle permet seulement de corriger la moyenne.

La méthode de correction quantile-quantile, ou quantile mapping, est reconnue comme une méthode plus robuste (Déqué, 2007 ; Gobiet et al, 2015 ; Themeßl et al., 2012) Elle consiste à estimer la correction en fonction des quantiles de la distribution de probabilité de la variable en question.(Colmet-Daage A.,2018). Un quantile de la distribution simulée est remplacé par le même quantile de la distribution observée.

Une fois estimée, la fonction de correction est appliquée à la variable issue des simulations de climat futur qui peut être finalement prise en compte dans des études d'impact.

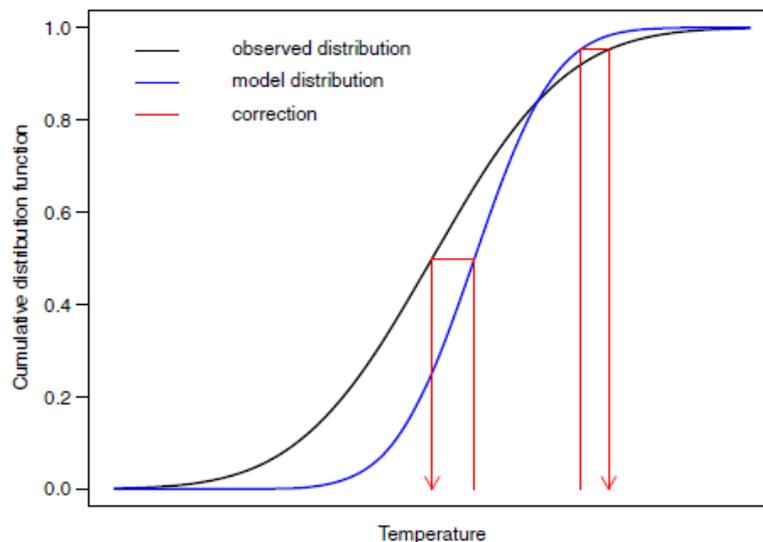


Figure 3.13: Schéma des corrections de biais par quantile mapping.

La valeur simulée, qui est un quantile de la distribution de la simulation, est remplacée par la valeur équivalente au même quantile dans la distribution observée. (Maraun D., 2016)

III.4. Impact des changements climatiques sur le bassin de la Chiffa

III.4.1. Evaluation des performances des MCR Cordex-Afrique

Afin d'évaluer les performances des modèles climatiques régionaux CNRM et MPI, nous avons comparé les données de précipitations et de températures simulées par les modèles avec les observations au cours de la période de référence 1981-2005. Les MCR offrent des données simulées passées pour la période de 1951 à 2005. Toutefois, compte tenue de la disponibilité des données observées nous avons choisi la période de contrôle 1981-2005.

La comparaison entre les données observées et les données simulées se fait par l'estimation du biais

$$\text{Biais} = \frac{\bar{P}_{sim} - \bar{P}_{Obs}}{\bar{P}_{Obs}}$$

Où :

P_{sim} : Précipitation simulée

P_{obs} : Précipitation observée

III.4.1.1. Simulation des pluies passées par les MCR

La comparaison entre les précipitations observées et simulées par les deux modèles CNRM et MPI au cours de la période (1981-2005) montre que :

- Les modèles CNRM et MPI montrent la même variation saisonnière et reproduisent correctement le cycle saisonnier des précipitations. Ainsi, Les pluies simulées sont plus importantes en période humide (octobre-Mai) et plus faibles en période sèche (juin-septembre) (fig 3.14)
- Les modèles CNRM et MPI ont du mal à reproduire les précipitations mensuelles observées à l'échelle du bassin de la Chiffa (fig3.14). Le biais estimé entre les pluies observées et simulées varie en moyenne entre -14% et -70% à l'échelle mensuelle (tableau 3.2), il est plus importante en hiver (environ -60%) et dépasse -50% à l'échelle annuelle. Ce qui montre que les modèles CNRM et MPI sous-estiment fortement les précipitations à l'échelle du bassin de la Chiffa. (tableau3.3)

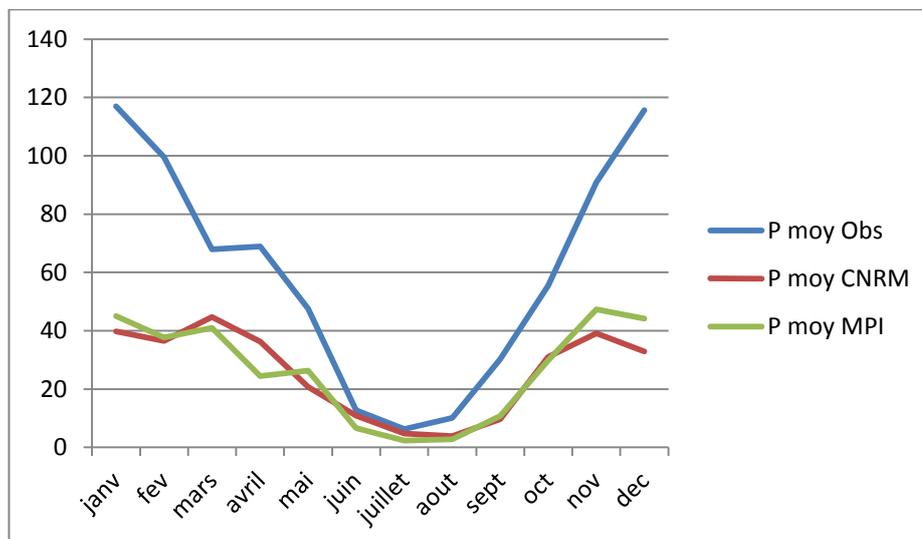


Figure 3.14: Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques

Généralement, les biais élevés estimés en période sèche s'expliquent par la faible quantité des pluies en cette saison. Alors que pour la période humide, les précipitations simulées par les modèles dépendent des paramètres pris en compte par chaque modèle. Effectivement, plusieurs études ont montré que les modèles climatiques régionaux ont tendance à sous-estimer les pluies en période humide (Taibi s et al.,2015,2020). Ceci est dû au fait que la résolution des modèles climatiques si fine qu'elle soit ne permet pas de tenir compte de phénomènes plus régionaux tel que le relief qui est à l'origine des pluies orographiques ce qui est le cas de notre zone d'étude qui se trouve à l'aval de l'Atlas Blidéen.

Dans ce cas une correction du biais est nécessaire afin de corriger les données brutes simulées par les modèles climatiques.

Tableau 3.2 : le biais estimé entre les pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005

Biais	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	an
CNRM	-66.03%	-63.36%	-34.09%	-47.34%	-56.34%	-14.51%	-24.49%	-61.30%	-67.98%	-44.05%	-56.96%	-71.53%	-57.03%
MPI	-61.50%	-62.12%	-39.65%	-64.48%	-44.68%	-47.92%	-62.56%	-72.56%	-64.44%	-46.22%	-47.89%	-61.81%	-55.92%

Tableau 3.3 : le biais estimé entre les pluies observées et simulées saisonniers au cours de la période de référence 1981-2005

Biais	Hiver	Printemps	Eté	Automne
CNRM	-67.14%	-44.79%	-32.90%	-54.80%
MPI	-61.79%	-50.23%	-59.64%	-50.20%

III. 4.1.2. Simulation des températures passées par les RCM

La comparaison entre les températures observées et simulées par les modèles CNRM et MPI au cours de la période de référence montre que :

- La variation des températures mensuelles interannuelles observées et simulées est quasi-similaire (fig3.15)
- Le modèle CNRM reproduit exactement les températures mensuelles observées en hiver (Biais=0) alors qu'il sous-estime les températures observées aux autres mois de l'année. Le biais varie entre -0.2°C (-1%) et -2.2°C (-12%)
- Le modèle MPI présente de meilleures simulations à l'échelle saisonnière. Le biais est d'environ 0.2°C au printemps et en été, il est de -0.6°C en automne et 1°C en hiver

- A l'échelle annuelle, la différence de température entre les observations et les simulations est d'environ $-0,8^{\circ}\text{C}$ avec le CNRM et $0,1^{\circ}\text{C}$ avec le MPI ce qui correspond respectivement à un pourcentage de -5% et 1% (tableau3.4).

Dans l'ensemble les modèles MPI et CNRM reproduisent de manière satisfaisante les températures observées au sein du bassin de la Chiffa. Ceci s'explique du fait que les températures n'ont pas une variabilité spatiale importante contrairement aux précipitations. Cependant une correction du biais est nécessaire pour affiner les simulations à l'échelle mensuelle.

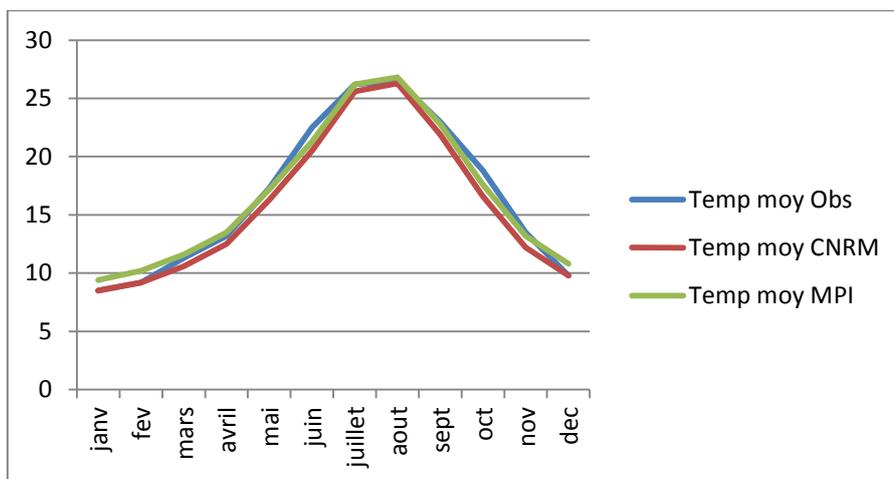


Figure 3.15 : Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques

Tableau 3.4: le biais estimé entre les températures observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005

Biais	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	an
CNRM	0	0	-0.7	-0.7	-1	-2	-0.6	-0.2	-1.1	-2.2	-1.3	0	-0.8
MPI	0.9	1	0.3	0.3	-0.1	-1.2	0	0.3	-0.2	-1.2	-0.3	1	0.1
CNRM%	0%	0%	-6%	-5%	-6%	-9%	-2%	-1%	-5%	-12%	-10%	0%	-5%
MPI %	11%	11%	3%	2%	-1%	-5%	0%	1%	-1%	-6%	-2%	10%	1%

Tableau3.5 : le biais estimé entre les températures observées et simulées saisonniers au cours de la période de référence 1981-2005

Biais	Dec/jan /fev	Mar/Av/Mai	Ju/Jul/Aou	Sep/Oct/Nov
CNRM	0.1	-0.8	-0.9	-1.5
MPI	1	0.2	-0.2	-0.6

III.4.2. Projection Climatique à l'horizon 2099

III.4.2.1. Evolution future des précipitations

Les modèles CNRM et MPI offrent des données de pluies simulées jusqu'à 2100 pour deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP8.5. Pour analyser l'évolution future des précipitations les données simulées au cours de la période de projection 2074-2099 ont été comparées aux simulations passées au cours de la période de contrôle 1951-2005.

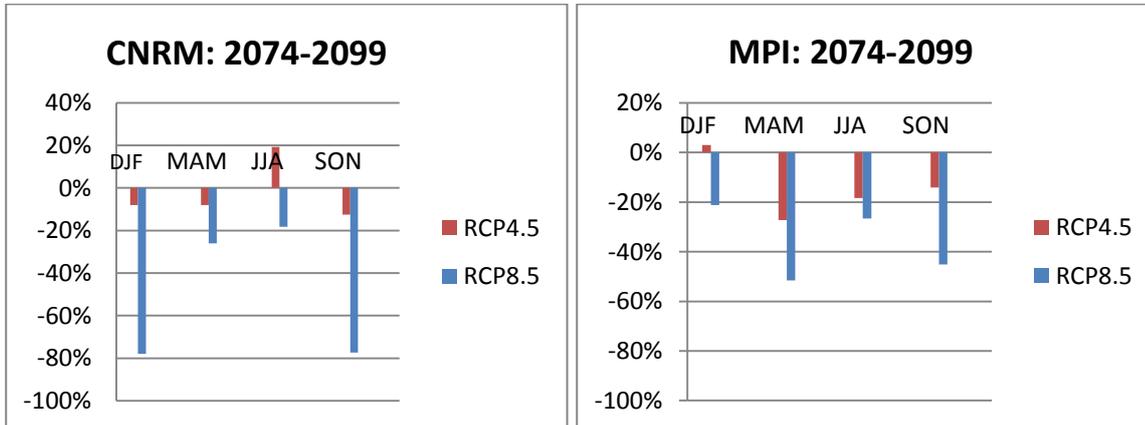


Figure 3.16: simulations des pluies futures par le modèle MPI et CNRM au cours de période de projections et pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

Concernant le scénario optimiste RCP 4.5, le modèle CNRM estime une diminution des précipitations de 8% à 12 % en hiver, printemps et automne ainsi qu'une augmentation d'environ 20% des températures en été d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Tandis que le modèle MPI simule une augmentation non significative des précipitations en hiver et une diminution de 14 à 27% pour les autres saisons.

Concernant le scénario pessimiste, les deux modèles simulent une diminution encore plus importante des précipitations au cours de la période 2074-2099, particulièrement en hiver et en automne pour lesquelles le modèle CNRM prédit une baisse de 70% de la pluviométrie, alors que le modèle MPI prédit une diminution d'environ 50% au printemps et en automne.

III.4.2.2. Evolution future des températures

L'évolution future des températures annuelles simulées par les modèles CNRM et MPI montre une augmentation de 1.7°C pour le RCP 4.5 et 3.6°C pour le RCP 8.5. La différence de températures entre le passé et le futur estimée par les deux modèles est identique même si les valeurs des températures mensuelles sont différentes.

A l'échelle saisonnière les deux modèles prédisent également la même variation de température au cours de la période 2074-2099 qui s'exprime par une augmentation qui varie entre 1.5 et 1.9°C selon le RCP 4.5 et entre 3°C et 4.3°C selon le RCP 8.5.

Cette augmentation des températures simulée par l'ensemble des modèles (CNRM et MPI) pour les deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5) va engendrer une augmentation de l'évapotranspiration ce qui va influencer négativement sur la disponibilité des ressources en eau au sein du bassin versant de Chiffa.

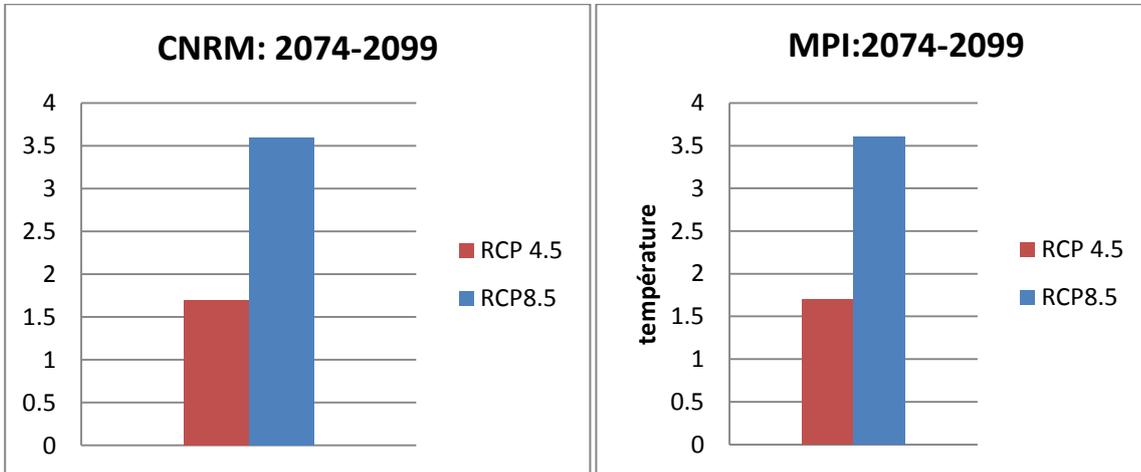


Figure 3.17: Projection des températures par les modèles CNRM et MPI à l'échelle annuelle au cours de la période de projection 2074-2099

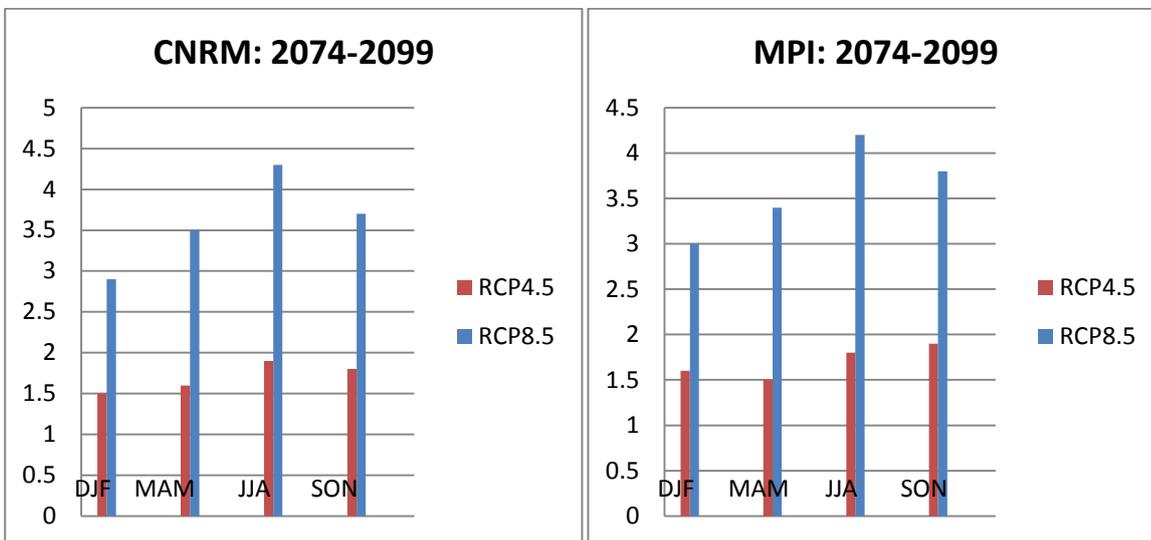


Figure 3.18: Projection des températures par les modèles CNRM et MPI à l'échelle saisonnière au cours de la période de projection 2074-2099

III.4.2.3. Evolution future des ETP

Pour déterminer l'ETP il est donc primordial de simuler les températures futures selon la formule de Thorntwhaite donné par :

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

Avec:

- ETP(m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm,
- T : moyenne interannuelle des températures du mois, °C
- a : $0.016 * I + 0.5$
- I indice thermique annuel :

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

- F(m,φ) : facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude:

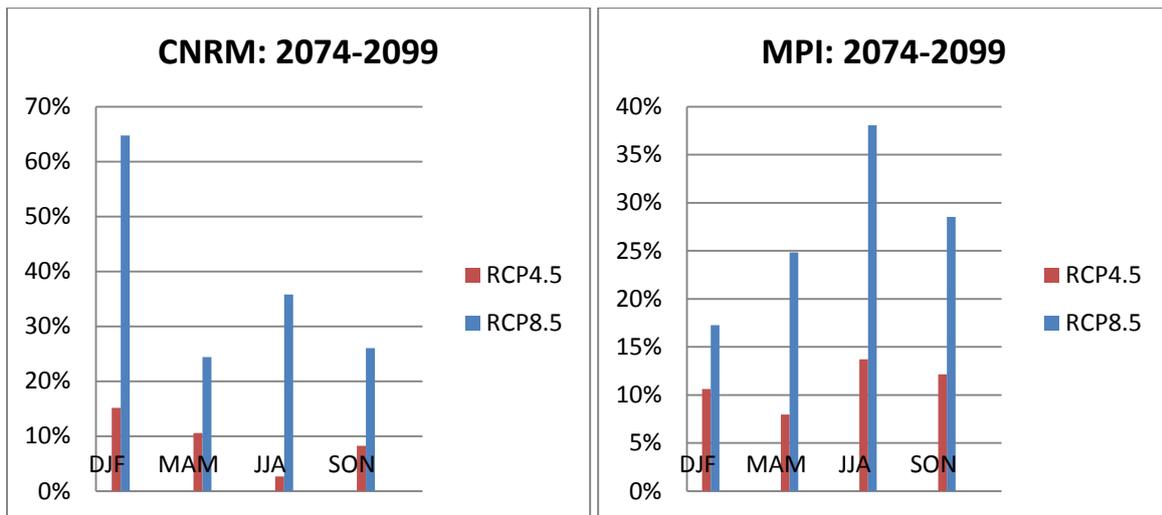


Figure 3.19: Variation des ETP à l'horizon 2099 pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 d'après le modèle MPI et CNRM

L'évaluation de l'évapotranspiration par le modèle CNRM avec les deux scénarios d'émission montrent une augmentation marquée pour la saison hivernale avec un taux de 64.77% estimé par le scénario pessimiste (RCP 8.5) à l'horizon 2099.

Dans l'ensemble des résultats le RCP 4.5 prédit une augmentation assez faible entre 5% -16% par rapport à celle estimée par le scénario RCP8.5 qui peut atteindre plus de 20%. Le modèle MPI simule une augmentation des ETP particulièrement en été avec un taux de 38.06% selon RCP 8.5 tandis que RCP 4.5 estime une faible augmentation de 7.96% en printemps. À l'échelle annuelle le scénario pessimiste estime une forte augmentation d'ETP que le RCP4.5 qui atteint 32% à l'horizon 2099.

Dans l'ensemble des résultats les projections des ETP montrent une grande variation au futur vu qu'elles dépendent aux variations des températures qui sont à la fois déjà montré par les modèles CNRM et MPI qu'il ya une grande différence entre les températures futur et celles observés environ 4°C entraînant des impacts graves, étendus et irréversibles surtout sur le domaine secteur socio-économique et la disponibilité des ressources en eau.

III.4.3. Correction de biais des sorties de modèles climatiques par les méthodes quantile-quantile et Delta

L'analyse de la variabilité passée et future des précipitations et des températures brutes issues des sorties de modèles climatiques CNRM et MPI ont montré des biais importants particulièrement entre les pluies observées et simulées au cours de la période de contrôle 1981-2005, ce qui risque d'affecter les simulations futures. A cet effet, des méthodes de correction quantile-quantile (Q-Q) et delta ont été utilisé afin de corriger et d'affiner les simulations des deux MCR (voir la section III.3).

Dans cette partie nous présentons uniquement la correction du biais appliqué aux précipitations.

Les méthodes de correction de biais permettent de corriger les simulations futures en se basant sur la différence entre les données observées et simulées au cours de la période de contrôle (figure 3.20). Pour comparer les deux méthodes, un coefficient d'échange est calculé, il correspond à la différence entre les données simulées futures corrigées et les données observées par rapport aux observations. Il nous renseigne également sur l'évolution future des précipitations (augmentation ou diminution) au cours de la période de projection 2074-2099. Il faut savoir qu'il n'existe pas de règle spécifique qui permet de juger la performance d'une méthode de correction de biais par rapport à une autre. Souvent, dans la littérature, c'est la méthode quantile-quantile qui est jugée comme étant la plus pertinente par rapport à la méthode delta.

Dans notre cas, la comparaison entre les deux méthodes est basée sur les coefficients d'échange les moins biaisés, du fait que les données corrigées futures sont comparées aux précipitations observées au bassin de la Chiffa d'une part et aussi en choisissant la méthode qui présente les projections les moins pessimistes pour pouvoir proposer des mesures d'adaptation moins drastiques et donc plus simple à mettre en œuvre.

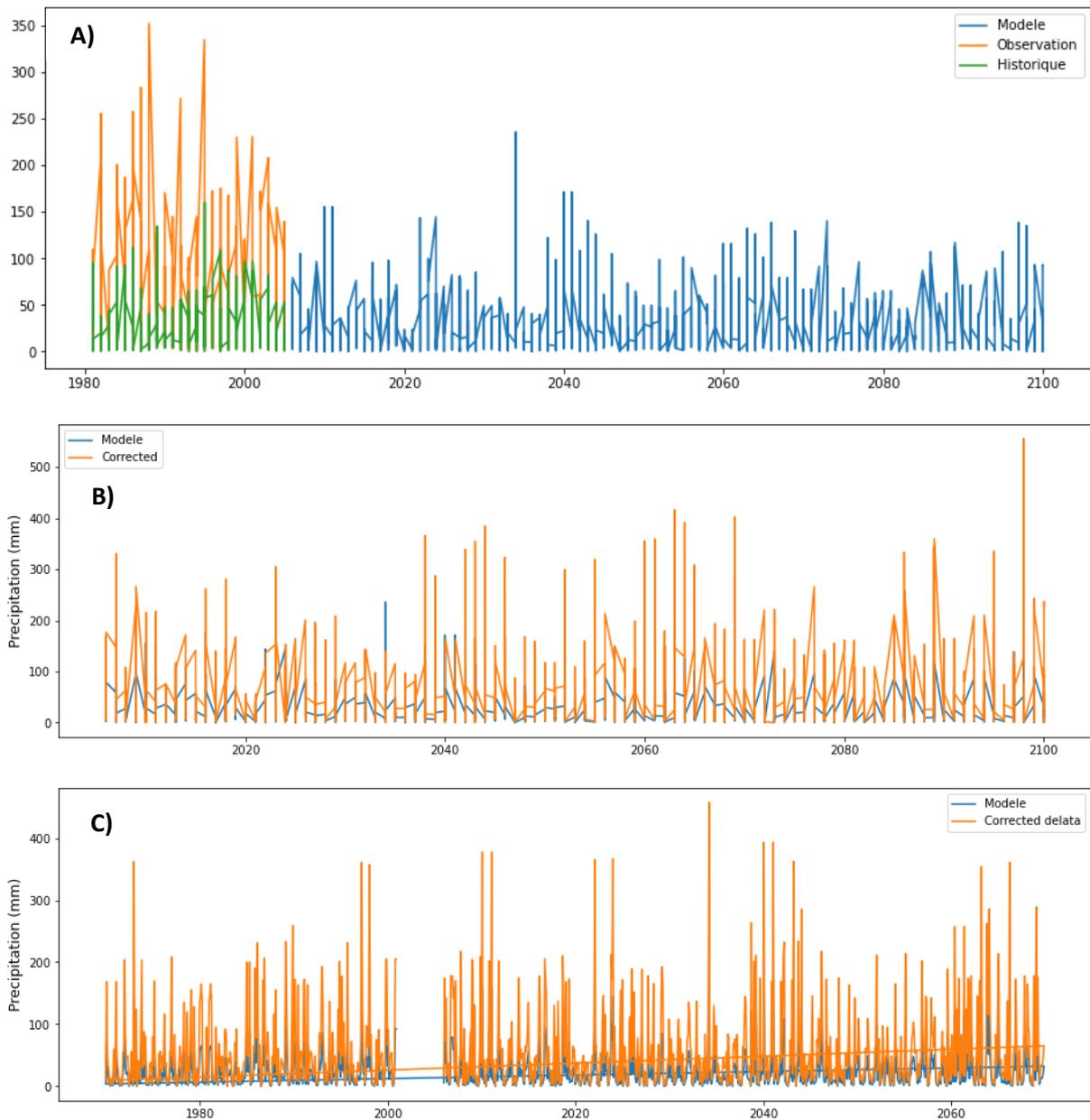


Figure 3.20 : Différence entre les pluies observées et simulées (A), simulations futures après correction du biais par q-q (B) et delta (C). Cas du modèle CNRM, RCP 4.5

A l'échelle annuelle, les résultats montrent que la différence entre les pluies observées et les pluies simulées corrigées par les deux méthodes de correction du biais n'est pas aussi importante que ça pour les deux modèles et les deux scénarios d'émissions. Toutefois la méthode Q-Q reste la moins biaisée concernant le modèle CNRM (fig3.21 ,fig 3.22), contrairement aux simulations du modèle MPI pour qui la méthode delta est la moins biaisée (fig 3.23, fig 3.24).

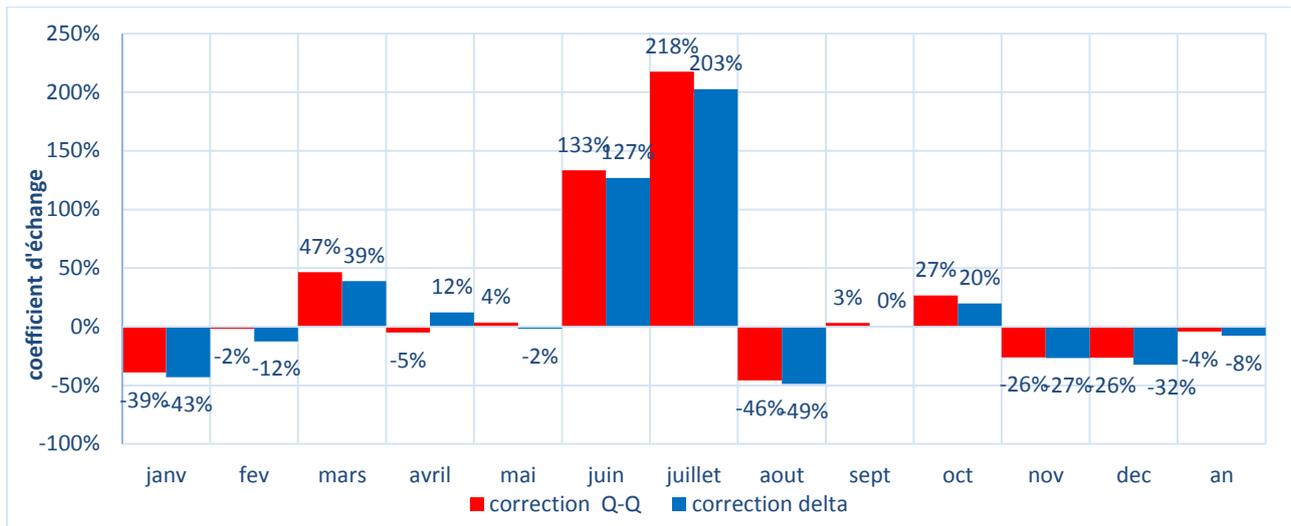


Figure 3.21 : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle CNRM et les observations pour le RCP 4.5

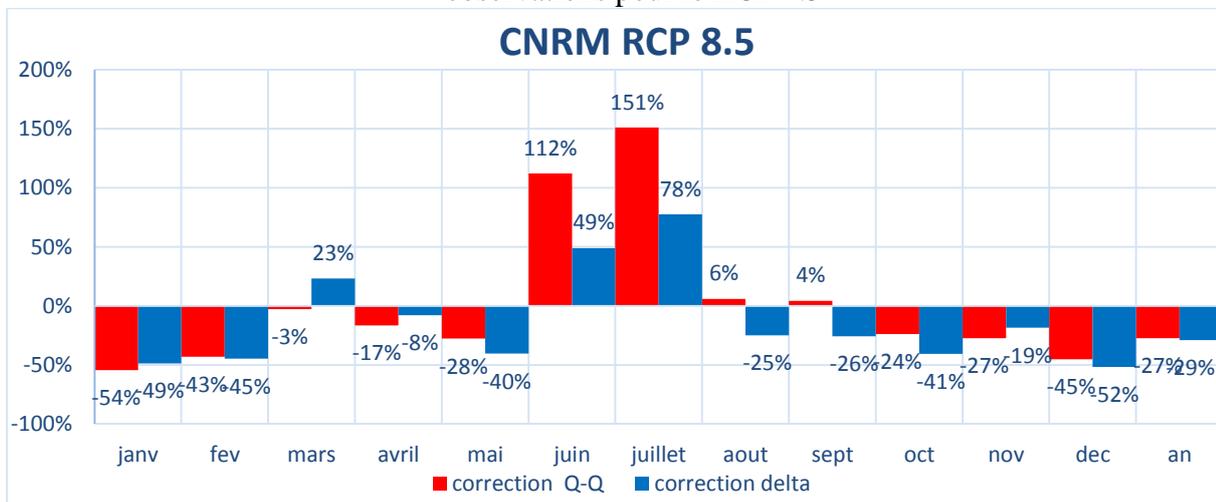


Figure 3.22 : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle CNRM et les observations pour le RCP 8.5

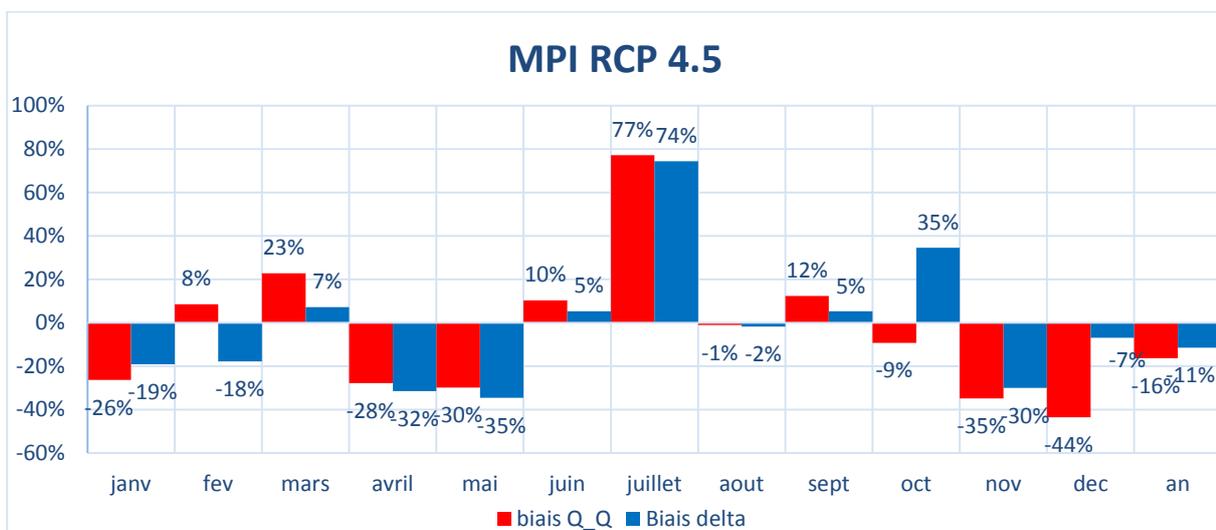


Figure 3.23: Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle MPI et les observations pour le RCP 4.5

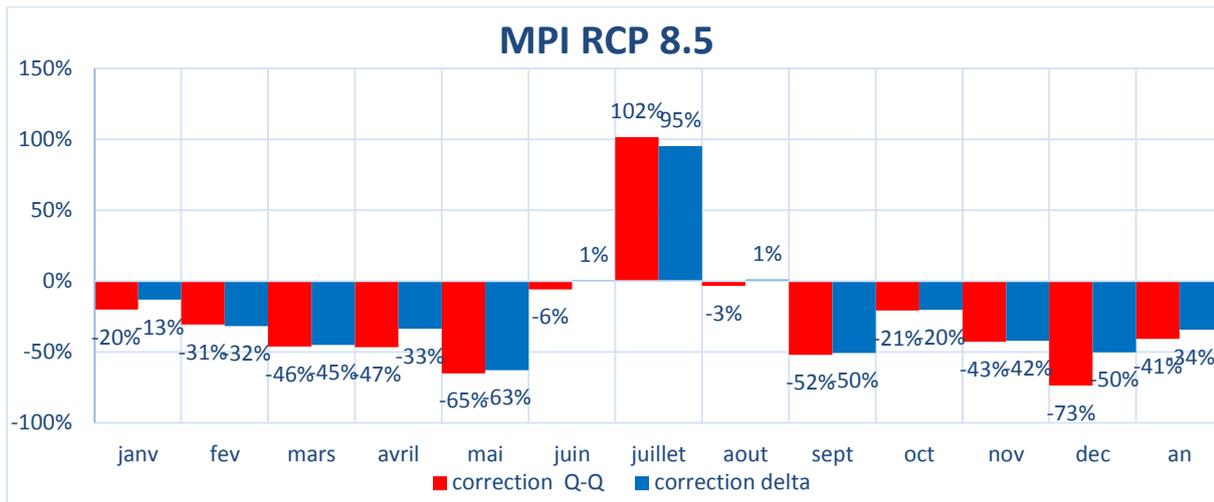


Figure 3.24 : Comparaison entre les pluies simulées corrigées du modèle MPI et les observations pour le RCP 8.5

A l'échelle mensuelle, les simulations corrigées du modèle CNRM montre que pour la période humide (octobre à mai), la méthode Q-Q est la moins biaisée pour les deux scénarios d'émissions. Le scénario optimiste RCP 4.5 simule une diminution significative des précipitations en hiver (décembre et janvier) et une augmentation des pluies au printemps (mars, mai) d'ici la fin du 21^{ème} siècle. La réduction de la pluviométrie est encore plus importante pour toute la période humide selon le RCP pessimiste RCP 8.5, ce qui va affecter négativement les écoulements du bassin de la Chiffa.

D'après le scénario RCP 4.5, le modèle MPI simule une réduction de la pluviométrie qui est plus importante au printemps (avril et mai) qu'en hiver (janvier et février), alors que le scénario RCP 8.5 une réduction importante de la pluviométrie au cours de la période humide qui varie entre 30% et 50%.

III.4.4. Impact des changements climatiques sur les écoulements du bassin de la Chiffa

Les écoulements futurs du bassin de la Chiffa sont simulés à l'aide du modèle hydrologique GR2M. Les précipitations et les ETP simulées au cours de la période de projection 2074-2099 sont introduites dans le modèle et grâce aux paramètres X1 et X2 spécifique au bassin on obtient les débits futurs.

Dans ce travail il s'agit de voir si les méthodes de correction du biais ont un effet sur la variabilité future des écoulements simulées par les modèles CNRM et MPI. Pour cela nous avons comparées les débits simulées issues des données d'entrée brutes de précipitations et d'ETP ainsi que les débits issues des données d'entrée corrigées par la méthode quantile-quantile par rapport aux données observées.

Concernant les débits futurs simulés par les données non corrigé, les résultats montrent que :

- Les débits simulés par les données issues des deux modèles climatiques sont pratiquement identiques, du fait que les précipitations et les ETP simulées soient aussi proches.
- Les débits simulés montrent une augmentation au futur, pour les deux scénarios alors que les pluies simulées futures sont en diminution. L'évolution future des précipitations et des écoulements n'est pas en adéquation d'où l'intérêt de corriger les pluies futures simulées pour améliorer les résultats des écoulements.

L'évolution des débits simulés futures issues des précipitations corrigées par la méthode Q-Q concorde dans l'ensemble avec l'évolution future de la pluviométrie et l'ETP corrigées. Ce qui met en évidence l'importance des méthodes de correction de biais dans les études d'impact en hydrologie.

Selon le RCP 4.5, le modèle CNRM (ainsi que le MPI) simule une diminution de 9% des écoulements en hiver et une augmentation de 6% au printemps (fig 3.25) à l'horizon 2009. En été, une diminution de 3% est simulé par le modèle tandis qu'en automne une réduction de 57% des écoulements est simulées, ceci s'explique principalement par la réduction importante des écoulements au mois d'octobre. Effectivement ce mois est caractérisé par une hausse importante des températures ce qui augmente l'évaporation ainsi qu'une réduction de la pluviométrie.

Le scénario pessimiste RCP 8.5 (fig3.26) prédit une diminution plus importante des écoulements en hiver (-9%) et aucune modification au printemps à l'horizon 2009 par rapport à la période de contrôle 1981-2005.

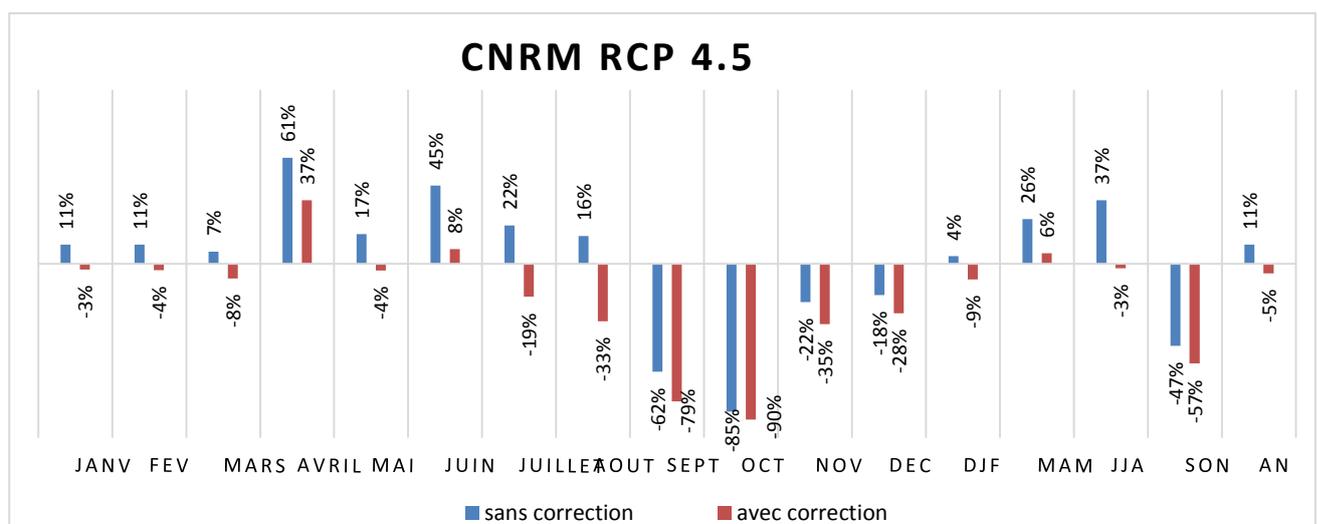


Figure 3.25 : variation des écoulements futurs (2074-2099) par rapport aux observations (1981-2005) à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle selon le RCP 4.5

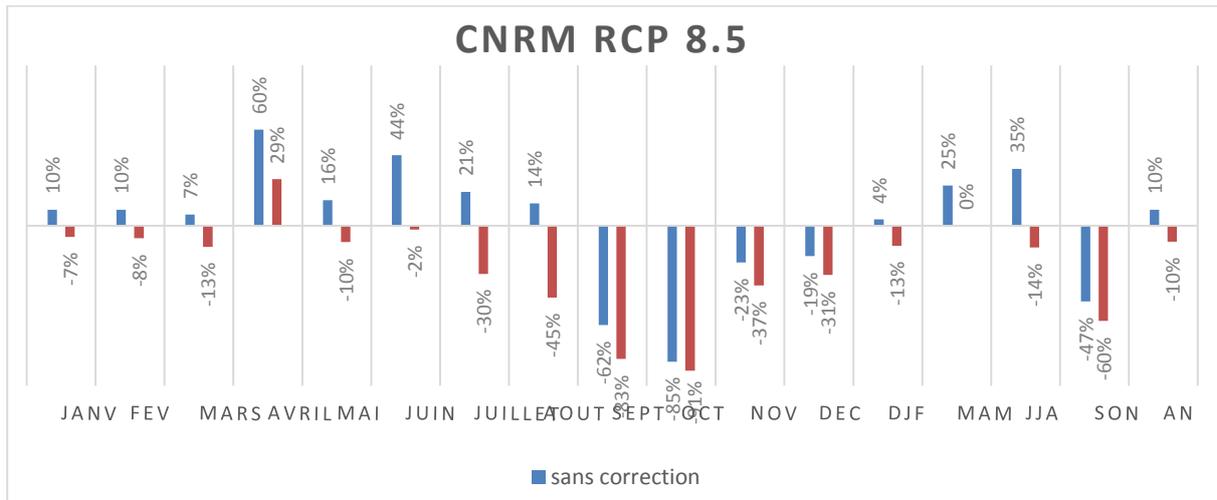


Figure 3.26 : variation des écoulements futurs (2074-2099) par rapport aux observations (1981-2005) à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle selon le RCP 8.5

Conclusion

Suite à un état de l'art sur les modèles et scénarios climatiques ainsi que quelques exemples de leur application en Algérie, il ressort que la qualité des modèles varie d'une façon importante en fonction de la région d'évaluation, de la variable considérée et du forçage de grande échelle, d'où la nécessité d'une correction des sorties de modèles. Effectivement, les modèles climatiques régionaux CNRM et MPI ont montré des biais très importants au cours de la période de contrôle particulièrement pour les précipitations ce qui a affecté les simulations des débits futurs. Suite à une correction du biais des précipitations et des ETP par les méthodes Q-Q et Delta, Les résultats ont montré une nette amélioration des simulations des débits futurs pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, ce qui montre l'importance des méthodes de correction de biais dans les études d'impact en hydrologie.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au cours de ces dernières années la communauté scientifique s'intéresse de plus en plus à l'évolution du climat dans des scénarios de changements climatiques, mais ce qui les intéresse encore plus ce sont les études d'impacts socio-économiques et environnementaux.

Ce travail a pour objectif d'analyser l'impact des changements climatiques sur les écoulements du bassin de la Chiffa, ce qui nécessite l'association d'un modèle hydrologique avec les modèles climatiques.

Le modèle hydrologique GR2M a été calibré et validé sur le bassin de la Chiffa au cours de la période 1981-2012. L'évaluation de la performance du modèle par le critère de Nash a montré des résultats très satisfaisant avec un Nash de 75% pour l'étape de calage et 99% pour l'étape de validation, ce qui a permis d'obtenir les paramètres X1 et X2 spécifique au bassin.

Les sorties de modèles climatiques régionaux CNRM et MPI du programme Africa-Cordex ont été utilisées pour obtenir les pluies et les températures simulées passée et future pour deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. L'évaluation des performances des modèles climatiques au cours de la période de contrôle 1981-2005 a mis en évidence des biais importants (environ 50%) particulièrement pour les précipitations ce qui risque d'affecter les simulations des débits futurs. A cet effet, une correction du biais par les méthodes quantile-quantile et delta ont été appliquées aux précipitations et évapotranspirations afin d'améliorer les simulations des débits futurs du bassin de la Chiffa au cours de la période 2074-2099 et pour les deux scénarios climatiques. Les résultats ont montré que la méthode quantile-quantile participe à l'amélioration des débits simulés. Effectivement l'évolution des écoulements futurs sont en adéquation avec l'évolution future des précipitations, contrairement aux débits simulés issues des données non corrigées, ce qui met en évidence l'importance de la correction du biais dans les études d'impact des changements climatiques.

L'évolution des débits simulés au cours de la période 2074-2099 montre une réduction de 5% et de 10% des écoulements respectivement pour les RCP 4.5 et RCP 8.5 qui est plus importante en hiver et en automne. Ces résultats sont toutefois conditionnés par un certain nombre d'incertitudes, les plus importantes sont ; la paramétrisation des modèles climatiques ; la distance de la station par rapport au point de maille le plus proche ; la résolution du modèle qui ne permet

pas de tenir compte du relief, la distance par rapport à la mer plus on se rapproche de la mer les simulations sont de meilleure qualité.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- Achour K., Meddi M., Zeroual A., Bouabdelli S., Maccioni P., Moramarco T .,2020. Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. *Journal of Earth System Science*, v.129, p.1-22.
- Adjim H ., 2018.Contribution a l'étude des phenomenes hydrologiques-cas de la sechresses : Application au bassin du barrage Hammam Boughrara. Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd, Algérie, p16.
- Amiar S., 2014. Modélisation Pluie-Débit : Outil De Prévision Des Crues Le Mieux Adapté Par Le Modèle Hydrologique GR. Mémoire de magistère, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie, p.121.
- Ana M ., Blas .V.G., Deborah V., Didier G.,Ernesto R.,Ernesto T.,Fernando B.L., Jean-Michel S ., Jordi C., José M. C ., José M.G ., Juan I.L., Laura T., Marc P., Miguel A. S., Penélope G., Petra R., Pilar A ., Ramón C ., Roberto S ., Simon G., Yolanda L .,2018. Le changement climatique dans les Pyrénées impacts, vulnérabilités et adaptation : Base de connaissances pour la future Stratégie pyrénéenne d'adaptation au changement climatique. Juan T et Idoia A, p.9.
- Aoubouazza M ., Rajel R., Essafi R.,2019. Impact des phénomènes climatiques extrêmes sur les ressources en eau et l'agriculture au Maroc, *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, n.2, v.7, p .223-232.
- Arneth A ., Barbosa H ., Benton T., Calvin K., Calvo E., Connors S., Cowie A., Davin E., Denton F., van Diemen R., Driouech F., Elbehri A., Evans J., Ferrat M., Harold J., Haughey E., Herrero M., House J., Howden M., Hurlbert M., Jia G., Johansen T. G., Krishnaswamy J., Kurz W., Lennard C., Myeong S., Nagmeldin M., Masson-Delmotte V., Mbow ., McElwee P. Mirzabaev A., Morelli A., Moufouma-Okia W., Nedjraoui D., Neogi S., Nkem J., De NobletDucoudré N., Olsson L., Pathak M., Petzold J., Pichs-Madruga R., Poloczanska E., Popp A., Pörtner H.O., Pereira J.P, Pradhan. P., Reisinger A.,Debra C.R., Rosenzweig C., Rounsevell M., Shevliakova E., Shukla P., Skea J., Slade R., Smith P., Sokona Y., Sonwa D. J, Soussana J.F, Tubiello F., Verchot L., Warner K., Weyer N., Wu J., Yassaa N., Zhai P., Zommers Z .,2019. Changement climatique et terre: Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des sols, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. GIEC- 4, p. 6.
- Barriopedro D.,Sousa P.M., Trigo R.M., García-Herrera R.,Ramos A.M.,2020. The Exceptional Iberian heat wave of summer 2018.*Special Bulletin of the American Meteorological Society*, v.101, p.29 – 34.
- Bellali H., Hchaichi A ., Talmoudi K., Harizi C., Chahed M., 2018. Effect of climate change on vector-borne diseases: Emerging and increasing incidence of zoonotic cutaneous leishmaniasis in Central Tunisia. *Revue d'Épidémiologie et de santé publique*, v. 66, p.337.
- Benblidia M. et Thivet G., 2010. Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique d'offres. *Les notes d'analyse du CIHEAM*, n.52, pp.2-12.
- Bokoye A., 2007. Description sommaire des méthodes de mise à échelle statistique (MAS). *Approches méthodologiques et outils de l'évaluation des impacts des changements climatiques*, pp.7-8.

- Boucher O., Braconnot P., Masson Delmotte V., Salas D., 2019 .Conférence de presse : Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises .CRNS/CEA/Météo-France, pp. 16-21.
- Boudiaf B., Dabanli I ., Boutaghane H ., Şen Z.,2020. Temperature and Precipitation Risk Assessment Under Climate Change Effect in Northeast Algeria. Earth Systems Environment, v.4, p.1-14
- Boutaghane Hamouda., 2017.Variabilité temporelle des précipitations sur le nord-est algérien. Eau Société Climat (ESC) p.6.
- Caffrey P., Farmer A, 2014. A REVIEW OF DOWNSCALING METHODS FOR CLIMATE CHANGE PROJECTIONS. African and Latin American Resilience to Climate Change, pp.2-3.
- Caloiero T., Coscarelli R., Gaudio R., Leonardo G.P., 2018. Precipitation trend and concentration in the Sardinia region. Theoretical and Applied Climatology, v.137, p.297 – 307.
- Charron I., 2016. Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l’information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d’adaptation. Canada, pp.9-10-12-14 -15-18.
- Cheloufi N .et Foual I ; 2018. Modélisation hydraulique du bassin versant de l’oued EL Hammam par HEC-RAS. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Algérie, pp.9-10.
- Colmet-Daage A ., 2018. Les impacts du changement climatique sur les pluies et les inondations extrêmes de bassins versants mésoéchelles méditerranéens,Thèse de doctorat, École doctorale GAIA,France,p.27-28.
- Cramer W., Guiot J., Fader M., Garrabou J., Gattuso J.P., Iglesias A., Lange M.A., Lionello P., Llasat M.C., Paz S., Peñuelas J.,Snoussi M.,Toreti A.,Tsimplis M.N.,Xoplaki E.,2019.Les risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans la region méditerranée : Une évaluation préliminaire par le réseau MedECC l’interface science-décideurs - 2019.MedECC, pp.5-22.
- Delaigue O., Coron L., Perrin C., Andreassian V., Thirel G., airGR : un package de modélisation hydrologique pour la simulation des débits, irestea, p.1
- Djelloul F., 2014. Contribution à l’étude de la relation ‘pluie-débit’ : cas de quelques sous bassin du côtier Algérois. Thèse Master, Ecole National Supérieur d’Hydraulique, Algérie, p.45.
- Drobinski P., 2015. Modèles globaux ou régionaux : comment zoomer le climat ? (consulté le 01/04/2020). Disponible sur le site: (<https://interstices.info/modeles-globaux-ou-regionaux-comment-zoomer-le-climat/>)
- Drogoudi P., Kazantzis K.,Kunz A., Blanke M., 2020. Effects of climate change on cherry production in Naoussa, Greece and Bonn, Germany: adaptation strategies. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, v.5, p.1- 6.
- Eid M., Elsaied H. G., Abdel Basset H., 2019. Temperature analysis over Egypte. Al-Azhar Bulletin of Science, v.30, p. 13-30.
- Elmeddahi Y et Ragab R.,2019. Assessing the Climate Change Impact
- Espinoza S. V. M.,2017. airGR un package de modélisation hydrologique à améliorer ? Évaluation sur un large échantillon de bassins versants .Mémoire de master, Université Pierre et Marie Curie,France ,p.8.
- Eu, 1995-2020. changement climatique [en ligne]. (Consulté le 22/03/2020).Disponible sur site : (https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_fr).
- Freya B, 2013. IPCC: Six graphs that explain how the climate is changing. (Consulté le 02/05/2020). Disponible sur le site : (<https://www.carbonbrief.org/ipcc-six-graphs-that-explain-how-the-climate-is-changing>)

- Futura planète., 2020. -planète-modèle climatique. (Consulté le 31/05/2020). Disponible sur le site: (<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-modele-climatique-12896/>).
- Gentilucci M., Materazzi M., Pambianchi G., Burt P., Guerriero G., 2019. Assessment of Variations in the Temperature-Rainfall Trend in the Province of Macerata (Central Italy), Comparing the Last Three Climatological Standard Normals (1961–1990; 1971–2000; 1981–2010) for Biosustainability Studies. *Environmental Processes*, v.6 , p.391- 412.
- GIEC, 2017. Le GIEC et le sixième cycle d'évaluation. (Consulté le 03/06/2020). Disponible sur le site (https://archive.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_fr.pdf)
- Giorgi F., Jones C., Ghassem R., Asrar., 2009. L'expérience CORDEX: répondre aux besoins d'information climatologique à l'échelle régionale, n3, vol 58, p.179.
- Gouvernement de Canada., 2013. Notions élémentaire sur l'eau: le cycle hydrologique [en ligne].Consulté le 12/03/2020. Disponible sur le site:(<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/notions-elementaires/cycle-hydrologique.html>)
- GREC-SUD., 2020. Climat. (Consulté le : 02/06/2020). Disponible sur le site: (<http://www.grec-sud.fr/article-cahier/articles-du-cahier-climat/perspectives-futures/quelles-options-pour-la-transition/>).
- Hadour A., Mahé G., Meddi M. 2020. Watershed based hydrological evolution under climate change effect : an example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v.28, p. 1-13.
- Hallouz F., Meddi M ., Mahe G., Karahacane H., Rahmani S. A.,2019. Trend in precipitation and evolution of discharge in a climate change context: wadi Mina watershed in Algeria. *Journal of Water Science*, n.3, v.32, p.83-114.
- Hélène G., 2014.Modéliser et simuler : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, v.2, p.67-108.
- Henine H., 2005. Interfaçage entre un modèle hydrologique et un modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluant les SIG. Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, pp.29-30.
- Hernandez-diaz L., Laprise R., Sushama L., Martynov A., Winger K., Dugas B., 2012. Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Springer*, n40, p.1415–1433.
- Hingray B., Picouet C., Musy A., 2014. *Hydrologie2 : Une science pour l'ingénieur*. Science et ingénierie de l'environnement , p. 108.
- Huard F., 2013. Régionalisation statistique pour les études d'impact du changement climatique : pourquoi et comment. *INRA AgroClim*, p.10.
- IPCC., 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, p. 161
- Jaques J., 2018. Introduction à R, p.4.
- Jie C , Chao L , François P. B , Hua C , Mingna W , Gilles RC .E.,2017. 60-Correction de biais des sorties de mode les climatiques: doit-on tenir compte des corrélations inter-variable? *OURANOS*.
- Jonathan M. H., Brian R., Anne-Marie C., 2017.L'Économie du Changement Climatique Mondial .GDAE,pp.1-70.
- Le Guen V., 2019. Environnement [en ligne]. (Consulté le 19/03/2020).Disponible sur le site:(<https://www.francebleu.fr/infos/environnement/jusqu-a-7degc-en-2100-les-scientifiques-aggravent-leur-previsions-sur-le-rechauffement-climatique-1568729937>)

- Maraun D., 2016. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Current Climate Change Reports*, v. 2, p. 211–220.
- Markonis Y., Batelis S.C., Dimakos Y., Moschou E., Koutsoyiannis., 2017. Temporal and spatial variability of rainfall over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, v.130, p.217-232.
- Mata E. S., 2017. airGR un package de modélisation hydrologique à améliorer ? Évaluation sur un large échantillon de bassins versants. Mémoire de fin d'études, Université Pierre et Marie Curie, France, p.8.
- Mebarkia A., Boufekane A., 2020. Human activity impact on surface water quality in semi-arid regions: a case study of Aïnzedda lake (North-East Algeria). *Water Science & Technology Water Supply*.
- Melki A., Abida H. 2019. Impact of climatic variation on infiltration rate under an arid climate: case of Northern Gafsa Watershed, Tunisia. *Environment development and sustainability*, p.1-16.
- Météo France, 2018. Les scénarios du GIEC. (Consulté le 06/07/2020). Disponible sur le site : (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>).
- Météo France, 2018. Bulletins climatiques [En ligne]. (Consulté le 03/05/2020). Disponible sur le site : (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2018>)
- Mostafa A.N., Wheida A., El Nazer M., Adel M., El Leithy L., Siour G., Coman A., Borbon A., Magdy A.W., Omar M., Saad-Hussein A., Alfaro S.C., 2019. Past (1950–2017) and future (–2100) temperature and precipitation trends in Egypt. *Weather and Climate Extremes*, v. 26, p.1-12.
- Nashwan M. S., Shahid S., Chung E.S., 2020. High-Resolution Climate Projections for a Densely Populated Mediterranean Region, *Sustainability*, v.12, p.22.
- Nichane M. et Khelil M. A., 2015. Changements climatiques et ressources en Eau en Algérie : Vulnérabilité, Impact et stratégie. Mémoire de fin d'études, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, p 58.
- Nouaceur Z., Laignel B., Turki I., 2013. Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien? *Physio-Gio*, volume 7, p.308-309.
- Organisation météorologique mondiale. 2018. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2018. N° 1233, Genève2.
- Ouhamdouch S., Bahir M., Ouazar D., 2020. Climate change impact assessment on a carbonate aquifer under semi-arid climate: example of the Cenomanian-Turonian aquifer within Meskala-Ouazzi region (Essaouira Basin, Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 13 Pérez-Zanón N., Sigró J., Ashcroft L., 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*, n.4, v.37, p.1922 – 1937.
- Pérez-Zanon N., Sigró J., Ashcroft L., 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*, n.4, v.37, p.1922-1937.
- Perrin C., Michel C., Vazken A., 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural. Cemagref, pp.4-6-7-8-14.
- Peter S., Jacob A., Omar B., Pep C., Anny C., Chris D., Arthur G., Stephen H., Matthias H., Kirsten I., John K., Ruth M., Rodica N., Selvaraju R., Katherina S., Michael S., Oksana T., Blair T., Markus Z., 2019. The Global Climate in 2015–2019. WMO, p.17.
- Prignon M., 2016. Incertitude sur les données climatiques en Afrique inter comparaison de divers jeux de données. Mémoire de Master, Université de Liège, Belgique, pp.15-16-18-20-27.

- Rahmani D., 2020. Sécheresse ou pas, l'Algérie demeure un pays pauvre en ressources en eau. *Journal Elwatan*.
- Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., 2016. Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen : quelles tendances entre 1950 et 2013 ? *CyberGeo : European Journal of Geography Environnement Nature, Paysage*, document 760, v.107.
- Santo-Espírito F., Ramos A.M., Lima M.I.P., Trigo R.M., 2014. Seasonal changes in daily precipitation extremes in mainland Portugal from 1941 to 2007. *Regional Environmental Change*, v.14, p.1765- 1788.
- Scorzini A.R., Leopardi M., 2019. Precipitation and temperature trends over central Italy (Abruzzo Region): 1951–2012. *Theoretical and Applied Climatology*, v.135, p.959-977.
- Serge J., Aubertin C., Martial B., Edmond D., Guégan J., Thierry L., Hubert M., Benjamin S., Magali R., 2015. Changement climatique: Quel défis pour le sud ? *IRD*, pp .69-70.
- Serrano-Notivoli R., Begueria S., Angel-Saz M., Luis M., 2018. Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain .*International Journal of Climatology*, n.11, v.38, p.4211- 4224.
- SARR B., 2018. Ressources [en ligne]. (consulté le 3/5/2020). Disponible sur le site : (https://www.sifee.org/static/uploaded/Files/ressources/contenu-ecole/niamey/volet-3/02_SARR_TRAORE/SARR_TRAORE_resume.pdf).
- Sinan J. et Tombul M., 2018. Long –term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey. *Meteorological applications*, v.25, n.3, p.445-455.
- Taïbi S., Meddi M., Souag-Gamane D., Mahé G., 2013. Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *IAHS Publ*, v.359, p.191-197.
- Taïbi S., 2016. Influence de la circulation atmosphérique générale sur les précipitations du Nord de l'Algérie. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'hydraulique, Algérie, p .7-8.
- Taïbi S., 2019. Management Intégré des Ressources en Eau (MIRE), Cour Master2. Université Blida 1.
- Taïbi S., Meddi M., Mahe G., 2019. Seasonal rainfall variability in the southern Mediterranean border: Observations, regional model simulations and future climate projections. *Atmosfera, Universidad Nacional Autonoma de Mexico*, n. 1, v. 32, p.39-54.
- Taïbi S., 2019. Management Intégré des Ressources en Eau (MIRE), Cour Master2. Université Blida 1.
- Taïbi 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 J. Env. Sc. Technology*, v.7, n.2, p. 1860-1869.
- Tolika K., 2018. On the analysis of the temporal precipitation distribution over Greece using the Precipitation Concentration Index (PCI): annual, seasonal, monthly analysis and association with the atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, n.3-4, v.137, , p.2303–2319.
- Toudja A., 2017. Contribution sur la modélisation pluie débit par le modèle GR sur bassin versant de l'oued Sebaou (implémentation sous logiciel R). Mémoire de Master, Ecole National Supérieur d'Hydraulique, Algérie, pp.3841-54.
- Unal Y.S., Yuruk C., Incecik S., Topcu H.S., Deniz D., Temizoz H.P., 2020. Investigating urban heat island intensity in Istanbul .*Theoretical and Applied Climatology*, n.1-2, v.139, p. 175-190.
- Unfccc, 2015. État du climat en 2018 : les conséquences du changement climatique s'intensifient [en ligne]. (Consulté le 20/04/2020). Disponible sur le site : (<https://unfccc.int/fr/news/etat-du-climat-en-2018-les-consequences-du-changement-climatique-s-intensifient>).

- Wikipédia, 2019. Modèle de circulation général. (Consulté le 23/11/2016). Disponible sur le site:
(https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_circulation_g%C3%A9n%C3%A9rale)
- Zeghoud F.Z., 2018. Evaluation de la performance des modèles climatiques régionaux CORDEX dans la simulation des conditions climatiques actuelles au nord de l'Algérie. Mémoire de Master, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE - ARBAOUI Abdellah, Algerie, p.14.
- Zeroual A., 2016. Evolution du climat passé récent et futur en Algérie. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'hydraulique, Algérie, p.6.
- Zeroual A., Assani A.A., Meddi M., 2017. Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972-2013 period. Hydrology Research, n.2, v.48, p.584-595.
- 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 schem. Climate Dynamics, v.52, p.227-243.
- Zeroual A., Assani A. A., Meddi H., Bouabdelli S., Zeroual S., Alkama R., 2020. Assessment of Projected Precipitations and Temperatures Change Signals over Algeria Based on Regional Climate Model: RCA4 Simulations. The Handbook of Environmental Chemistry, p. 1-25.