

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
1جامعة سعد دحلب - البليدة -



Université SAAD DAHLAB –BLIDA 01-



Faculté de technologie

Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement

MÉMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Specialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

Comparaison de deux méthodes de correction de biais des sorties modèles climatiques pour la prévision des précipitations dans le bassin côtier oranais.

Soutenu le 21/09/2020

présenté par : M^{lle} MELHANI Naziha

Devant le jury :

-Mr BENSALIA D.	M.C.B.U.Blida 01	Président
-Mr HADDAD A.	M.C.B.U.Blida 01	Examineur
-Mme. TAÏBI-FEDDAL S.	M.C.B.U.Blida 01	Promotrice
-Mr ZEROUAL A.	M.C.B. ENSH	Co-promoteur

Promotion 2019/2020

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices;

*Mes remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers **الله** qui m'a doté
d'intelligence,*

*Et m'a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude. Je tiens
aussi à adresser mes remerciements à ma famille,*

*Et plus précisément à mes chers parents qui m'ont toujours soutenue et
poussée à continuer mes études.*

*Je souhaite également remercier toute personne ayant contribué de près ou
de loin dans le cadre de cette étude,*

*Qui ont bien voulu répondre à mes différentes questions sur le domaine dans
le but de permettre la facilité de l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à dresser mes vifs remerciements au membre de jury qui ont accepté
d'examiner mon travail de PFE*

*Un remerciement spécial à ma promotrice **M^{me} Taibi.s** qui malgré le temps
difficile nous a aidé à travers sa patience, sa bienveillance et ses remarques
pertinentes m'a informé et mis sur le chemin de ce projet de fin d'étude.*

*Enfin, je ne peux passer outre chaleureusement ma reconnaissance envers
mon co-promoteur **Mr zeroual A.**, pour sa bienveillance, son implication, et
sa disponibilité.*

*Mes remerciements les plus vifs vont aussi à tous les enseignants du
département des Sciences de l'eau et environnement qui ont contribué à ma
formation.*

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance,

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient,

Je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout
mon respect : mon cher père **Ahmed**.*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se
doit.*

*Ton attention me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes
côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents
obstacles.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes
exigences*

*Et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable maman
Nacera.*

*Ce présent travail a pu voir le jour grâce à leur présence, leur écoute, leur
confiance en moi et leur soutien constant m'assurent des bases solides me
permettant de continuer et de surpasser.*

*A mes frères, mes belles sœurs ceux qui m'ont chaleureusement supporté et
encouragé tout au long de mon parcours.*

*Mon cher fiancé qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir
tout au long de mes études. Que Dieu le protège et l'offre la chance et le
bonheur.*

*A mes adorables nièces Kamelia, Melina, Lilia que je leur souhaite la réussite
tous au long de leur parcours*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de la force et me souhaite
plus de réussite et de succès*

Merci !

ملخص:

يهتم المجتمع العلمي بشكل متزايد بقضية تغير المناخ وبشكل أكثر تحديداً في الماضي والمستقبل لتطور هطول الأمطار. يهدف هذا العمل إلى تقييم موثوقية عمليات المحاكاة الناتجة عن مخرجات النماذج المناخية للتنبؤ بهطول الأمطار في الحوض الساحلي لوهرا. للقيام بذلك، تمت مقارنة البيانات التي تمت محاكاتها بواسطة نموذجين مناخيين إقليميين لبرنامج AFRICA-CORDEX (CNRM) و MPI مع الملاحظات خلال فترة المراقبة 5002/1891. يتم بعد ذلك تصحيح البيانات المحاكاة المستقبلية باستخدام طرق التباين الكمي وطريقة دلتا لتحليل تطورها خلال فترة الإسقاط 5088-5002. أظهرت النتائج عموماً أن كلا طريقتي التصحيح تعطي نتائج تختلف عن نفس المحطة خاصة بالنسبة لنموذج CNRM، على عكس نموذج MPI. تشير معاملات التبادل المقدرة بين الملاحظات وعمليات المحاكاة المستقبلية إلى أن عمليات المحاكاة المستقبلية التي تم تصحيحها بواسطة طريقة دلتا هي الأقل تحيزاً مقارنةً بالمحاكاة المصححة بواسطة طريقة القياس الكمي. تظهر توقعات هطول الأمطار لفترة الإسقاط 5088-5002 بشكل عام أن سيناريو RCP 4.5 يحاكي انخفاض هطول الأمطار في معظم المحطات وهو أكبر في ظل سيناريو RCP 8.5 المتشائم. الكلمات المفتاحية: هطول الأمطار، نماذج المناخ الإقليمية CORDEX، دلتا، القياس الكمي.

Résumé :

La communauté scientifique s'intéresse de plus en plus à la question du changement climatique et plus précisément à l'évolution passée et future des précipitations. Ce travail vise à évaluer la fiabilité des simulations issues des sorties de modèles climatiques pour la prévision des précipitations dans le bassin côtier oranais. Pour ce faire les données simulées par deux modèles climatiques régionaux du programme AFRICA-CORDEX (CNRM et MPI) sont comparées aux observations pendant la période de contrôle 1981/2005. Les données simulées futures sont ensuite corrigées à l'aide des méthodes quantile-quantile et delta pour analyser leur évolution au cours de la période de projection 2074-2099. Les résultats ont montré de manière générale, que les deux méthodes de correction donnent des résultats différents pour la même station particulièrement pour le modèle CNRM, contrairement au modèle MPI. Les coefficients d'échange estimés entre les observations et les simulations futures indiquent que les simulations futures corrigées par la méthode Delta sont les moins biaisées par rapport aux simulations corrigées par la méthode quantile-quantile. Les prévisions des précipitations pour la période de projection 2074-2099 montrent dans l'ensemble que le scénario RCP 4.5 simule une réduction de la pluviométrie pour la majorité des stations qui est encore plus importante selon le scénario pessimiste RCP 8.5.

Mot clés : précipitations, modèles climatiques régionaux CORDEX, delta, quantile-quantile.

Abstract :

The scientific community is increasingly interested in the issue of climate change and more specifically in the past and future evolution of precipitation. This work aims to evaluate the reliability of the simulations resulting from the outputs of climate models for the forecasting of precipitation in the Oran coastal basin. To do this, the data simulated by two regional climate models of the AFRICA-CORDEX program (CNRM and MPI) are compared with observations during the 1981/2005 monitoring period. The future simulated data are then corrected using quantile-quantile and delta methods to analyze their evolution during the projection period 2074-2099. The results have generally shown that the two correction methods give results different for the same station especially for the CNRM model, unlike the MPI model. The estimated exchange coefficients between observations and future simulations indicate that future simulations corrected by the Delta method are the least biased compared to simulations corrected by the quantile-quantile method. The precipitation forecasts for the projection period 2074-2099 show overall that the RCP 4.5 scenario simulates a reduction in rainfall for the majority of stations which is even greater according to the pessimistic RCP 8.5 scenario.

Keywords: precipitation, CORDEX regional climate models, delta, quantile-quantile

Liste des abréviations

- **GIEC** : Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- **CCNUCC** : La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques.
- **GES** : les gaz à effet de serre .
- **OMM** : L'Organisation météorologique mondiale.
- **RCP** : representative concentration pathways.
- **PPm** : partie par million.
- **CORDEX** : Regional Climate Downscaling Experiment.
- **MCG** : Modèle climatique globale .
- **MCR** : Modèle Climatique régionale.
- **ESM** : Earth System Model .
- **CC** : changement climatique.
- **CEPMMT** : Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme .
- **MSE** : mean squared error .
- **NRMSE** : Normalized Root Mean Square Error.
- **MENA** : Moyen-Orient Afrique du nord.
- **CRU** : Climatic research unit.
- **GPCP** : Global Climatology Precipitation.
- **ABH** : agence des bassins hydrographiques.
- **ANRH** : agence nationale des ressources hydrauliques.
- **Q-Q** : quantile quantile.

Liste des figures

Fig I.1 : Différence entre la variabilité climatique et le changement climatique	4
Fig I.2 : Différence entre les GES naturel et entropique	4
Fig I.3 : Emission annuelle de GES par secteur	5
Fig I.4 : Evolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012	6
Fig I.5 : Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m ² sur la période 1850-2300 selon les différents scénarios	11
Fig I.6 : L'évaluation de température, précipitation et le niveau de mer à l'horizon 2100	12
Fig I.7 : Les interactions décrites par les modèles climatiques et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique	13
FigI.8 : Découpage en mailles des processus climatiques par les modèles climatiques (maille 200×200km)	14
FigI.9 : échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle	16
Fig I.10 : simulation passée et future	19
Fig I.11 : les domaines du projet Cordex	20
Fig I.12 : Exemple de la méthode de correction delta	23
Fig I.13 : Schéma des corrections de biais par quantile mapping	25
Figure II.1 .Situation géographique du bassin cotier Oranais par rapport à la région hydrographique Oranie-Chott Chergui	26
Figure II.2 :localisation géographique des postes pluviométriques et évolution des précipitations annuelles de chaque station au cours de la période 1981-2010	30
FigII.3 : variation des températures annuelles au cours de la période 1981-2010 de la région d'oranais	31
FigII.4 : Diagrammes ombrothermique de la zone d'étude	31
Fig II.5 : l'hydrographie du bassin (arctgis,2020)	32
Figure III.1 : Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques	36

Figure III.2. Différence entre les pluies passées (1981-2005) et futures (2074-2099) simulées par les modèles MPI et CNRM pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 37

Figure III.3 : 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 pour la station de Bousfer- 39

Figure III.4: Variation des précipitations futures (2094-299) par rapport aux observations (1981-2005) après correction de biais par la méthode Delta et Q-Q 40

Liste tableaux

Tableau I.1 : Estimation des températures, niveau de mer et de la concentration de CO ₂ jusqu'à 2100	7
Tableau I.2 : Caractéristiques principales des RCP(GIEC)	10
Tableau I.3 : Modèles climatiques régionaux-CORDEX avec les modèles globaux associés	21
Tableau II.1 : Tableau r récapitulatif du bassin	27
Tableau II.2 : caractéristiques géographiques et statistiques des stations pluviométriques de la zone d'étude	29
Tableau II.3 : Pluies moyennes mensuelles interannuelles des stations pendant la période (1981-2010)	30
Tableau II.4 : Données climatiques mensuelles interannuelles du côtier Oranais	31
Tableau II.5 : Entités hydrographique et leur potentialité totale	33
Tableau III.1: le biais estimé entre les pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005	35

Table des matières

Introduction générale.....	1
Variabilité et changement climatique	3
Définition	3
Causes et conséquences de la variabilité climatique	4
Les scénarios d'émission de GES.....	9
Les modèles climatiques	12
Définition	12
Les types de modèles climatiques	13
Les Modèles climatiques globaux (MCG)	13
Les modèles climatiques régionaux (MCR).....	15
Evaluation de la performance des modèles climatiques régionaux.....	16
Les simulations climatiques	19
Présentation des MCR du projet CORDEX-AFRICA	20
Méthodes de correction des sorties de modèles climatiques régionaux	22
Méthode du Delta.....	23
Méthode de correction quantile-quantile.....	24
Situation géographique de la zone d'étude.....	26
Le Relief.....	27
Climatologie	28
II.4 Répartition des ressources en eau dans le bassin	32
Evaluation des performances des MCR Cordex-Afrique	33
Evolution future des précipitations simulées par les MCR.....	35
III. Correction de biais des précipitations simulées.....	37
Conclusion générale	41
Références bibliographiques	43

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le changement climatique constitue aujourd'hui une préoccupation mondiale, les chiffres des potentialités hydriques ont tendance à diminuer partiellement et ce à cause d'une surexploitation des ressources en eau et la pénurie de précipitation sur une période déterminée engendrant par la suite une sécheresse qui peut toucher n'importe quel pays qui réunit les conditions climatiques suivantes : baisses des précipitations pendant une certaine durée accompagnée de températures élevées. Certaines zones sont plus vulnérables que d'autres et seules zones polaires et subpolaires sont épargnées par la sécheresse car elles sont entièrement recouvertes de glace. Et c'est dans les zones arides que l'on trouve les pays les plus vulnérables comme l'Afrique.

Pratiquement tous les pays du monde subissent des perturbations climatiques. Les études menées sur les changements climatiques montrent qu'au Maghreb le réchauffement climatique est plus important que la moyenne. Si au niveau mondial, la hausse a été évaluée à $0,74^{\circ}\text{C}$ ($0,56^{\circ}\text{C} \pm 0,9^{\circ}\text{C}$) au 20ème siècle, elle a été située entre 1°C et 2°C dans le bassin méditerranéen et la région de l'Afrique du Nord (GEIC, 2001 ; Hansen et al., 2006 ; GIEC, 2007).

Du fait de sa position géographique, l'Algérie fait partie des pays les plus vulnérables aux changements climatiques (Boudiaf et al., 2020 ; Hadour et al. 2020). Des études ont déjà mis en évidence une augmentation des températures de $0,2-0,4^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (Zeroual et al., 2016) ainsi qu'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 en eau superficielle du Nord de l'Algérie de 12,5 milliards de m^3 aux années 70 à 10 milliards de m^3 actuellement. Les événements extrêmes (sécheresse, pluviométrie déficitaires, augmentation des températures) ont eu des conséquences néfastes sur la satisfaction des besoins en eau de tous les secteurs socio-économiques, en particulier agricoles, et sur la préservation des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Selon les différents scénarios d'émissions (Ragabal., 2002 ; GIEC, 2007) plusieurs modèles de circulation générale (GCM) prédisent une augmentation de la température de $0,7^{\circ}\text{C}$ à plus jusqu'à 2100.

Les prévisions pour le changement climatique convergent vers une augmentation de la température à plus de 4 ° C et une diminution des précipitations (Ragabal., 2002 ; GIEC, 2007 ; Servat et al. 2007) d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

Pour évaluer les impacts à long terme du changement climatique, il existe des modèles climatiques régionaux qui permettent de simuler différentes variables climatiques à une échelle spatiale réduite de l'ordre de 50 Km à 12Km. Ces modèles produisent des données simulées jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle ce qui permet d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la variabilité pluviométrique future afin de mettre en œuvre les mesures d'adaptation nécessaires pour faire face à ce phénomène.

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 nécessite une correction afin d'affiner les simulations. Pour y remédier des techniques de correction de biais sont utilisées. Parmi les méthodes de correction des biais couramment utilisées ; la méthode de delta et la méthode quantile-quantile.

C'est ainsi, que ce travail a été conçu et qui porte sur la comparaison de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques pour la prévision des précipitations dans le bassin côtier oranais. Pour cela deux modèles climatiques régionaux de l'exercice Africa-Cordex(CNRM et MPI) ont été choisis afin d'évaluer la variabilité des précipitations futures, en fonction de deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP4.5 et RCP8.5). Les simulations futures des modèles sont ensuite corrigées par les méthodes quantile-quantile et Delta avant d'être utilisées pour l'analyse de la variabilité future des précipitations du bassin côtier oranais.

Ce travail est divisé en trois (03) chapitres :

- La premier chapitre dresse une synthèse bibliographique qui revient sur les différents travaux déjà menés dans le monde en méditerranée et en Algérie concernant la variabilité et les projections climatique.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude.
- Le troisième chapitre porte sur 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 future des précipitations.

Chapitre I

➤ **Synthèse bibliographique**

Chapitre I : synthèse bibliographique

Ce chapitre présente une synthèse des travaux menés sur l'évolution du climat passé et futur, notamment ceux du Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il s'agit d'une part d'exposer les conséquences du réchauffement climatique sur la variabilité des précipitations observées dans le passé à l'échelle globale et régionale et présenter d'autres par leur évolution future simulée par les modèles climatiques.

Variabilité et changement climatique

Définition

Il est très important de différencier entre changement et variabilité climatique. Les changements climatiques désignent une variation et perturbations statistiquement fondamentale significative de l'état moyen du climat dans une région donnée, pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus) par rapport à une moyenne référentielle. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres (Farah, 2014).

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son Article 1, définit les « changements climatiques » comme étant des « changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables. ». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les « changements climatiques » qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la « variabilité climatique » due à des causes naturelles (Bationon, 2009).

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen du climat d'un lieu donné à toutes les échelles temporelles et spatiales. La mesure de cette variation se fait par les modifications que subissent les paramètres climatiques comme la température, le vent et les précipitations (Farah, 2014).

La variabilité du climat se réfère généralement à court ou à moyen terme, aux fluctuations autour de l'état moyen du climat sur les échelles de temps allant de quelques années (15 à 30 ans).

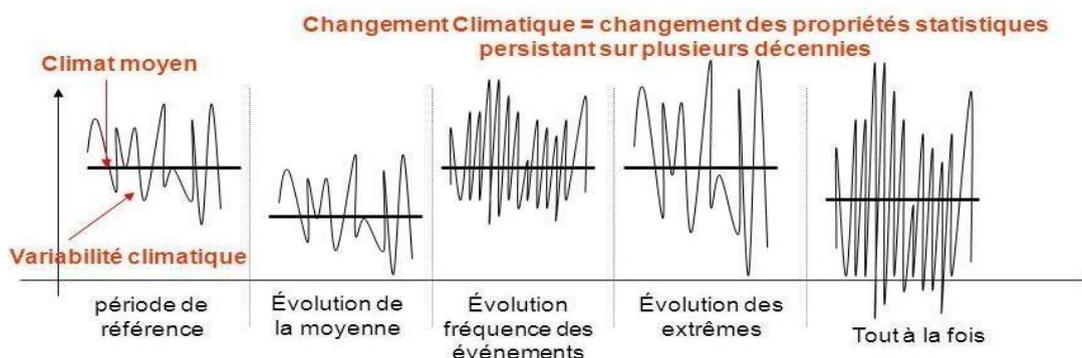


Figure I.1 : différence entre la variabilité climatique et le changement climatique

source : le climat

Causes et conséquences de la variabilité climatique

A l'origine du changement climatique il y a les gaz à effet de serre (GES). Ces gaz formant une couche qui se concentre dans le haut de l'atmosphère, sont naturellement présents dans l'atmosphère depuis toujours. Ils ont un rôle de régulateur en absorbant la chaleur du soleil, ils maintiennent la terre à une température moyenne de 15°C. Sans la présence des GES, il régnerait une température de -18°C. Cependant, depuis la révolution industrielle les activités humaines ont provoqué une augmentation artificielle des GES le filtre s'est transformé en une couche de plus en plus dense qui forme comme un manteau autour de la terre et retiens plus de chaleur c'est ce qui provoque le réchauffement de la planète.

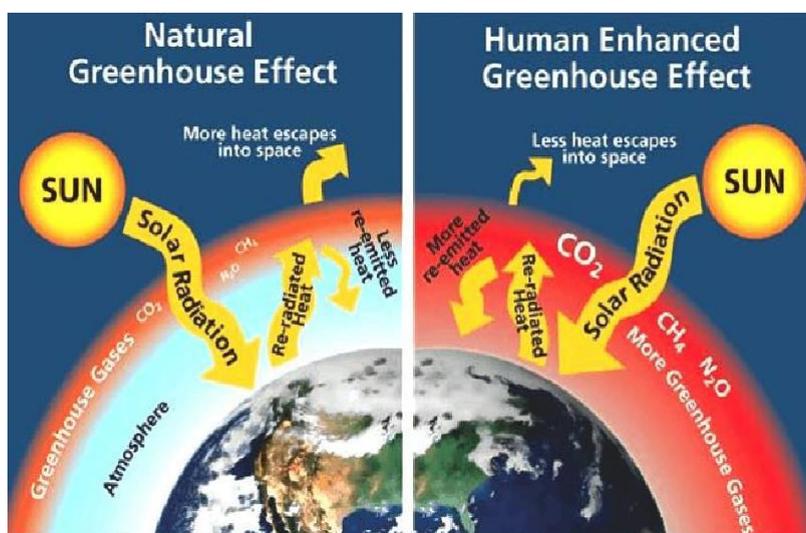


Figure I.2 :différence entre les GES naturel et entropique

Source: Center for Climate and Energy Solutions

L'augmentation des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère induit un déséquilibre des échanges d'énergie de la terre avec l'espace. Il en résulte un stockage d'énergie au niveau de la terre, provoquant alors une augmentation de température à la surface de la terre. Cette hausse de température s'accompagne d'autres changements affectant par exemple le régime des vents, la circulation des courants océaniques, le régime des précipitations.

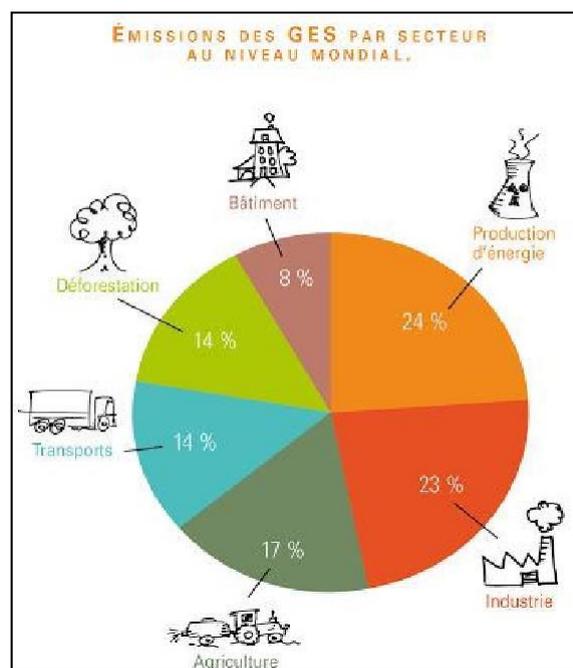


Figure I.3: Emission annuelle de GES par secteur

Source : climat, le dossier vérité, science&vie.2007

➤ Conséquences des changements climatiques à l'échelle globale

Dans son dernier rapport, le GIEC évalue la tendance moyenne de la température mondiale sur la période 1880–2012 égale à 0,85 ° C avec un degré d'incertitude compris entre 0,65 ° C et 1,06 ° C. La hausse survenue au cours de la dernière décennie (2003-2012) (NOAA,2015) est de + 0,78° C « pour un minimum de 0,72 ° C et un maximum de 0,85 ° C), considérant l'année 2014 comme la plus chaude jamais enregistrée, avec une anomalie de + 0,69 ° C « calculée pour la période 1880-2014 »(Nouaceur,2016).

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) considère la période 2011-2015 comme la plus chaude jamais enregistrée et l'année 2015 comme la plus chaude depuis le début des observations modernes à la fin des années 1800 (WMO,2016). Si, à l'échelle mondiale, l'augmentation des températures est incontestable, l'évolution de la pluviométrie mondiale est beaucoup plus contrastée car elle est soumise à une forte variabilité spatio-temporelle. Malgré

cette caractéristique, et compte tenu de l'augmentation des températures, une augmentation des précipitations est susceptible de se produire dans certaines régions du monde favorables à une telle évolution climatique. En effet, l'accélération du cycle hydrologique sous l'influence de fortes températures pourrait entraîner d'avantage de précipitations et d'évaporation (OMM,2014). Les résultats de plusieurs études sur l'évolution des précipitations dans de nombreuses régions du globe, comme cela se produit en Afrique du Nord, montrent que le changement climatique se traduit par des conditions plus humides ainsi qu'une augmentation des précipitations et la répétition d'événements extrêmes « perceptibles dans les dernières décennies 1991–2010 »(S. Planton, M. Déqué,2005).

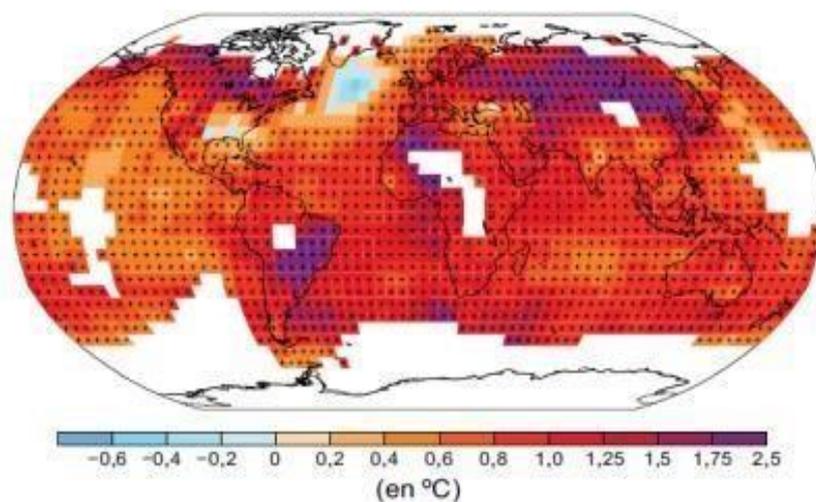


Figure I.4 : Evolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012

Source :GIEC.2013

Le GIEC a indiqué qu'en 2017, le réchauffement global a atteint $+1\text{ °C}$ ($\pm 0,2\text{ °C}$) par rapport à la période préindustrielle et que les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique provoquent une hausse moyenne des températures de l'ordre de $0,2\text{ °C}$ par décennie à l'échelle de la planète. À ce rythme, le seuil de $1,5\text{ °C}$ de réchauffement devrait être atteint dès 2040.

Une telle élévation de température est lourde de conséquences sur le climat mondial : les vagues de chaleur et les fortes précipitations seraient plus fréquentes dans de nombreuses régions du globe, les sécheresses plus fréquentes par endroit. Les calottes groenlandaises et antarctiques seraient possiblement déstabilisées, avec une possible élévation massive du niveau de la mer.

Si le réchauffement devait être encore plus prononcé pour atteindre par exemple 2 °C, les conséquences sur les écosystèmes les plus fragiles, la montée des eaux et l'accès aux ressources en eau et en nourriture des habitants des régions insulaires et subtropicales seraient encore plus marquées. Les contributions nationales proposées lors de l'accord de Paris ne permettront pas de limiter le réchauffement climatique futur de 2 °C d'ici la fin du siècle. Pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, il faut réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, méthane...). Plus ces réductions ne sont importantes et précoces, plus les chances de limiter le réchauffement à 1,5 °C sont grandes. Le scénario le plus communément envisagé pour 2100 est celui où la concentration en CO₂ aura doublé par rapport à l'ère préindustrielle pour s'élever à 560 ppm. **La température de la Terre s'élèvera alors de 3°C en moyenne d'ici à 2100, un scénario catastrophique.** Les scénarios compatibles avec un réchauffement à 1,5 °C imposent de réduire les émissions nettes à zéro en milieu de siècle et recourir massivement aux « émissions négatives », comme la bioénergie avec capture et séquestration de carbone.

En général, ce sont les populations des pays en voie de développement, qui seront le plus exposées aux conséquences des changements climatiques notamment à cause de leur manque de moyens.

Tableau I.1 : Estimation des températures, niveau de mer et de la concentration de CO₂ jusqu'à 2100

Source : futura-sciences

Estimations en 1995 par rapport à 1990	Estimations en 2001 par rapport à 1990	Estimations en 2007 par rapport à 1980/1999	Estimations en 2014 par rapport à 1986/2005
Hausse des températures moyennes en 2100			
+ 1°C à + 3,5°C	+ 1,5°C à + 5,8°C	+ 1,1°C à + 6,4°C	+ 0,3°C à + 4,8°C
Elévation du niveau de la mer jusqu'en 2100			
+ 0,15 à + 0,95 m	+ 0,08 à + 0,88 m	+ 0,18 à + 0,59 m	+ 0,26 à + 0,98 m
Niveau de la concentration de CO ₂ dans l'atmosphère jusqu'en 2100			
500 ppm	540 à 970 ppm	600 à 1 550 ppm	500 à 1 500 ppm

➤ **Conséquence des changements climatiques à l'échelle régionale**

La région méditerranéenne est une région particulière, une zone de transition entre le climat tempéré des latitudes moyennes et le climat plus chaud et sec de l'Afrique du nord, une mer semi fermée entourée de montagnes, elle est une des régions au monde les plus sensibles au changement climatique connue aujourd'hui comme un «hot spot». Le bassin méditerranéen est caractérisé par une forte variabilité spatiale et temporelle des conditions climatiques, océaniques et hydrologiques. Cette zone est soumise aux risques hydrométéorologiques : pluie intense comprises entre 600 mm et 1000 mm pour les pays du Nord et proche de 400 mm pour certains pays du Sud. La saison sèche dure en moyenne de un à deux mois au Nord, à plus de quatre mois, jusqu'à six ou sept, au Sud et à l'Est ,crues rapides, sécheresse et feux de forêts, vents locaux forts et submersion marine(Ducrocq ,2016).

L'étude menée par (Philandras et al ,2011) a montré que sur la base des projections futures du modèle climatique régional RACMO2 / KNMI que les précipitations annuelles dans la majorité de la Méditerranée sont très susceptibles de diminuer en moyenne de 20%, au cours de la période 2071–2100 par rapport à 1961–1990, Les travaux de (Giannakopoulos et al,2015) conduisent au même résultat avec une baisse des précipitations de 20% au sud de la Méditerranée selon un scénario de réchauffement climatique de + 2 ° C, tandis que (Tselioudis et al ,2018) sur la base des résultats du premier scénario ont montré une nette diminution de la valeur des précipitations hivernales d'ici la fin du 21e siècle. (Dubrovský et al,2014) ont analysé les conditions climatiques futures pour la région méditerranéenne sur la base de 16 modèles climatiques mondiaux. Les résultats montrent une augmentation des températures pour toutes les parties de la Méditerranée accompagnée d'une diminution des précipitations en hiver. (Giorgi et Lionello,2016) estiment qu'une baisse significative des précipitations en Méditerranée est attendue en relation avec l'intensification de la circulation anticyclonique et un déplacement vers le nord de la chaîne des zones de dépression cyclonique. (Alpert et al,2012) confirment une tendance à une forte augmentation des précipitations en Espagne et en Italie.

Au Maghreb, l'augmentation de la température suit la situation mondiale. Ainsi, 2013 est l'une des années les plus chaudes enregistrées en Tunisie depuis 1950. Effectivement, des études récentes ont montré que la tendance annuelle des précipitations en Tunisie est à la baisse pour 19 régions étudiées au cours de la période 1977-2011. Cette analyse met en évidence une rupture des séquences chronologiques pendant les périodes les plus caractéristiques de la grande sécheresse des années 1980 (1981–1992) et un retour des pluies au début des années

2000 (2001–2009). Cette dernière tendance est également confirmée par B. Laignel et al.(2014) pour le nord-est de la Tunisie. Enfin, Jebari et al. (2017) ont souligné la tendance à la baisse des précipitations au cours de la période(1960-2004).

L'Algérie souffre également d'un climat semi-aride à aride. Elle se trouve dans une région très vulnérable aux effets des changements climatiques. Ces risques émergents sont devenus aujourd'hui une réalité vécue. Plusieurs travaux concernant l'étude de la variabilité pluviométrique et des sécheresses ont été menés sur différentes régions du pays .L'ensemble de ces travaux ont mis en évidence que l'Algérie a subi depuis les années 70 une sécheresse récurrente avec une baisse de précipitations qui varie entre 10% et 33% durant les 20 dernières années enregistrée particulièrement au Nord-Ouest du Pays (Hamlaoui-Moulai et al. 2013 ; Meddi et al. 2010; Taibi et al. 2017; Zeroual et al. 2017).Ainsi, après deux décennies de sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée en Algérie et dans tout le Maghreb (M. Amyay *et al.*, 2012). L'évolution des températures (hausse des minima et des maxima) est conforme à la situation mondiale (A. Sebbar *et al.*, 2012 ; L. Amraoui *et al.*, 2011).

Les scénarios d'émission de GES

Pour quantifier les possibles futurs changements climatiques, les climatologues ont d'abord utilisé des situations idéalisées plus communément appelées scénarios ; quels seraient les changements climatiques si la concentration de CO₂ doublait ? Ou bien, si la concentration de CO₂ augmentait de 1 % par an (ce qui conduit à un doublement tous les 70 ans) ?

Le climat à venir est notamment fonction des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines. Or, les émissions humaines dépendent de notre consommation énergétique : chauffage et climatisation, transports, production de biens de consommation, activités agricoles, etc. Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de la démographie mondiale, l'économie, les modes de vie à travers la planète et aux progrès technologiques(météo France,2018).

L'élaboration de scénarios d'émissions est un processus qui se produit en parallèle avec le développement de modèles climatiques. Des équipes de chercheurs sont dédiés à l'évaluation de la façon dont les émissions vont évoluer dans le temps et ces scénarios sont ensuite utilisés pour résoudre des modèles climatiques afin de produire des simulations du climat futur, chacune dépendante d'un scénario d'émissions donné. Les concentrations de GES sont

présentement décrites par des trajectoires de concentration représentatives (representative concentration pathways-RCP). Ces scénarios d'émissions ont formé la base du cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5), publié en 2013. Les RCP contiennent des trajectoires d'émissions, de concentration et d'utilisation des terres, et visent à être représentatives des publications actuelles sur les émissions et la concentration de GES. L'hypothèse est qu'une trajectoire de forçage radiatif donnée peut provenir d'une gamme diversifiée de scénarios de développement socio-économique et technologique (CHARRON, 2016).

Tableau I.2 : Caractéristiques principales des RCP

Nom	Forçage radiatif	Anomalie de T (°C)	Concentration (ppm)	Trajectoire	SRES équivalent
RCP 8.5	>8,5 W/m ² en 2100	4.9	>1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissante	SRES A1FI
RCP 6.0	~6W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	3.0	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement	SRES B2
RCP 4.5	~4,5W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	2.4	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement	SRES B1
RCP 2.6	Pic a~ 3W/m ² en 2050 puis déclin à 2.6 W/m ² avant 2100	1.5	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin	Aucun

Les scénarios RCP sont donc quatre scénarios de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300 , un scénario RCP permet de modéliser le climat futur sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 :

le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de $+2,6 \text{ W/m}^2$ (puissance par unité de surface), le scénario RCP4.5 à $+4,5 \text{ W/m}^2$, et de même pour les scénarios RCP6 et RCP8.5. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe (Richard Mos et al, 2008).

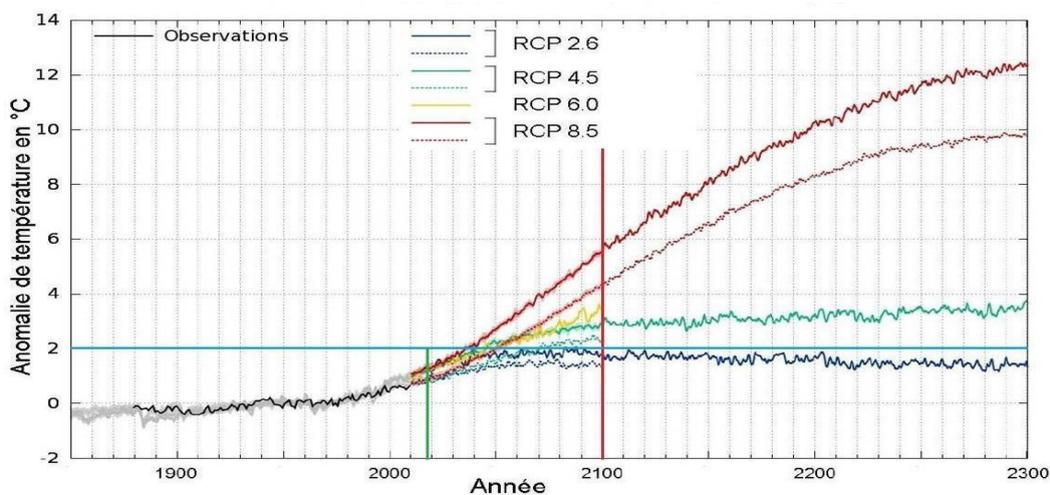


Figure I.5 : Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m^2 sur la période 1850-2300 selon les différents scénarios

Source : archive.ipcc

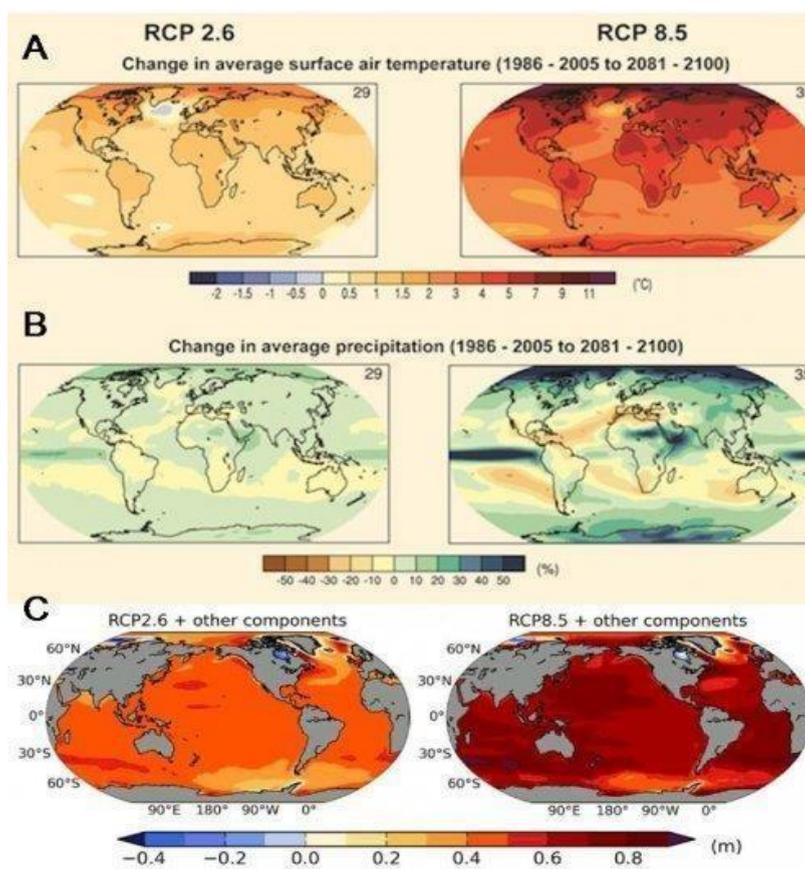


Figure I.6 : L'évaluation de la température(A)les précipitations moyennes(B)et le niveau de mer(C) pour le scénario RCP 2.6 (à gauche) et le RCP 8.5 (à droite) à l'horizon 2100

source: GIEC

Les modèles climatiques

Définition

Un modèle climatique est la représentation numérique de la planète et des interactions entre ses différents réservoirs qui modulent le climat : l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Pour y arriver, les experts définissent les paramètres et les équations qui représentent les lois physiques régissant le climat. Ces équations proviennent principalement des lois physiques fondamentales, d'autres paramètres ou relations sont issus des observations faites sur le terrain ces dernières dizaines d'années.

Ces lois sont ensuite traduites en ligne de code. Pour que l'ordinateur puisse faire ses calculs, il doit découper ce système complexe en un nombre fini de points. Pour cela on utilise un maillage on coupe la surface étudiée en petits carrés.

Les premiers modèles climatiques globaux utilisaient une maille d'environ 500 km, maintenant les modèles les plus performants utilisent une maille de 87km. Comme les modèles climatiques comprennent l'océan et l'atmosphère, ils ne se contentent pas d'une grille au niveau du sol mais ont également plusieurs couches dans l'atmosphère (youtube ,2016).

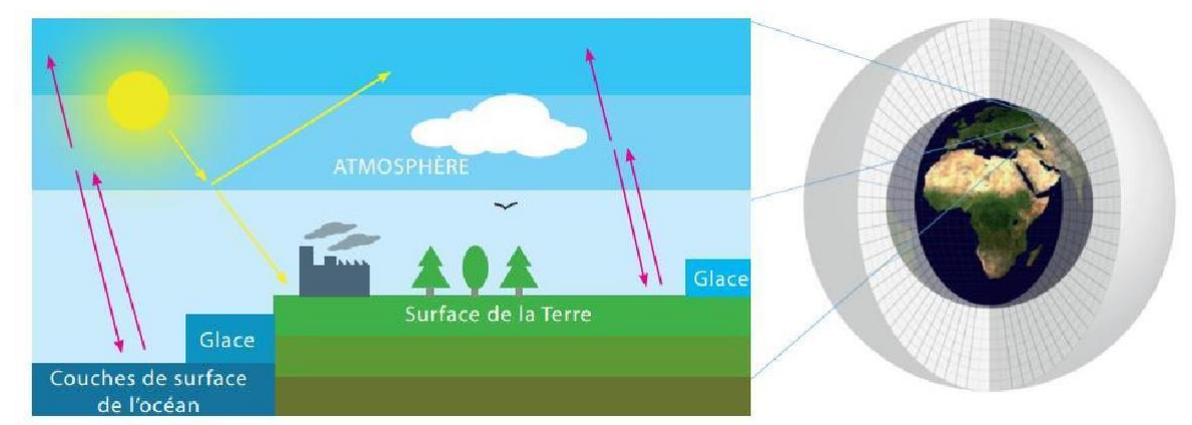


Figure I.7 : Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite)

Source : Ouranos

En modélisation climatique, on distingue deux catégories de modèles : les modèles climatiques globaux (MCG) et les modèles climatiques régionaux (MCR)

Les types de modèles climatiques

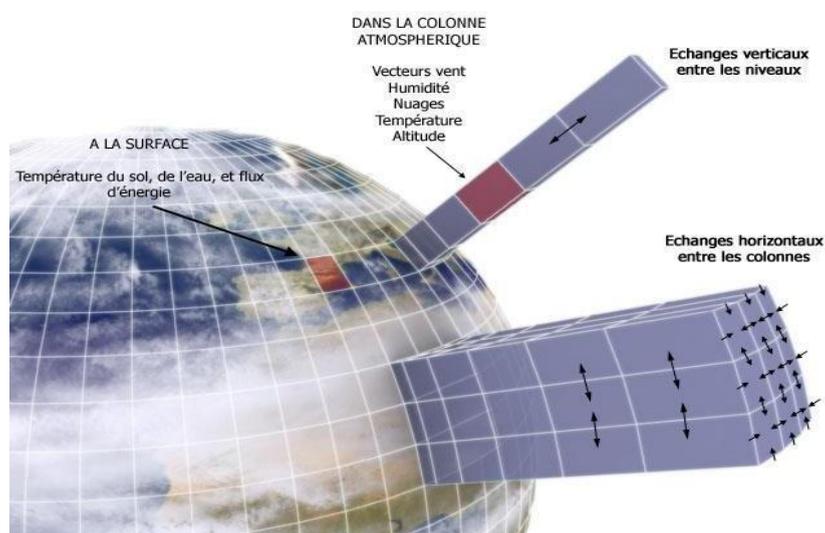
Les Modèles climatiques globaux (MCG)

Un modèle climatique global(MCG) peut fournir des informations de prévision fiable sur des échelles de l'ordre de 100 par 100 Km, couvrant ce qui pourrait être un paysage largement différent (de très montagneux aux plaines côtières plates, par exemple) avec un potentiel très variable pour les inondations, les sécheresses ou d'autres événements extrêmes. Ces modèles peuvent nous fournir des projections de la façon dont le climat de la terre peut changer à l'avenir. Ces résultats sont la principale motivation pour la communauté internationale de prendre des décisions sur l'atténuation des changements climatiques. Cependant Les études d'impact des changements climatiques ont besoin d'informations régionales ou locales à une résolution plus fine qui tient compte de la topographie, du sol, l'hydrologie, et la végétation, d'où l'intérêt des modèles régionaux (Anza, 2019).

Les résultats issus de ces modèles sont encore entachés d'incertitudes, parmi les limitations des modèles globaux : Faible résolution numérique spatiale (300 à 400 km) d'une part et d'autre le temps de calcul considérable que requièrent ces modèles toujours plus complexes. Par conséquent ils coûtent cher en termes de temps de calculs. Ils souffrent également de nombreuses limites dans la prise en compte de certains facteurs climatiques, tels que les nuages, et d'éventuels conflits ou catastrophes d'envergure planétaire, ou des évolutions (imprévisibles) de facteurs naturels (volcan, cycles naturels)(GIEC,2007).

Les modèles globaux n'arrivent pas à prévoir les précipitations compte tenu de leur très grande variabilité spatio-temporelle. Ce qui suppose des incertitudes plus grandes et des conséquences dans les zones où les précipitations restent les paramètres climatiques qui discriminent le mieux la saison.

Aussi, les MCG ont une résolution spatiale relativement grossière et ne peuvent pas représenter les détails fins qui caractérisent le climat dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les régions où l'orographie est complexe ou la couverture terrestre ou les côtes sont hétérogènes. Cela peut rendre leurs simulations climatiques d'utilisation limitée dans les études d'impact sur la biodiversité, les services écosystémiques, les systèmes agricoles, les distributions d'espaces et d'autres questions liées au paysage et à l'environnement. Ces types d'études d'impact et d'adaptation nécessitent des données avec une résolution spatiale beaucoup plus fine(Zeghoud, 2018).



FigureI.8 : Découpage en mailles des processus climatiques par les modèles climatiques (maille 200×200km)

Les modèles climatiques régionaux (MCR)

Contrairement au modèle climatique globale, les modèles climatiques régionaux(MCR) peuvent fournir des informations sur des zones à petite échelle 50/25/12km ce qui nous permet d'évaluer l'impact du changement climatique et de procéder aux planifications et de suggérer les moyens d'adaptations dans de nombreuses régions vulnérables du monde. Ajouté à cela, les MCR fournissent des projections avec beaucoup plus de détails et une représentation plus précise des évènements extrêmes localisés. L'espace géographique numérique est composé de cases, appelées les mailles. Les interactions entre mailles sont modélisées par un certain nombre d'équations mathématiques. Plus la maille est petite, plus le modèle est précis et donc plus il est fiable. Un modèle climatique cherche à approcher le plus possible la réalité, il essaie de représenter au mieux les forces qui induisent les mouvements atmosphériques, océaniques ou terrestres. Pour cela, le modèle part de conditions initiales connues des paramètres climatiques tels que la température, le rayonnement, l'humidité... et les fait évoluer en suivant le formalisme mathématique (Anza, 2019).

La description des processus physiques dans les MCRs est assez détaillée (Seidou,2017).Au cours des dernières années, les MCRs ont été largement utilisées (Zeghoud,2018) vu qu'ils permettent d'affiner la qualité de l'information issue de la modélisation numérique. Des techniques dites de descentes d'échelles permettent de passer du MCG au MCR en tenant compte plus finement de l'effet de l'orographie, ce qui n'est pas assez sensible avec les modèles globaux pour une certaine région. Le modèle régional est obtenu en forçant les conditions aux limites régionales par un modèle global, ce qui permet de prendre en compte, au niveau régional, des informations sur la circulation générale atmosphérique, de l'influence des températures de surface des océans. Les modèles régionaux peuvent avoir des résolutions de l'ordre de 10 à 50km. Heinzeller et ses partenaires, en collaboration avec les équipes de WASCAL et l'Université de Bonn ont récemment développés des simulations régionales pour l'Afrique de l'Ouest de 12km de résolution horizontale (Heinzeller et al., 2018).

Ces simulations permettent de combler les gaps en termes d'informations adéquates, d'améliorer la qualité des informations produites et d'anticiper sur les effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques (Heinzeller et al., 2018). La résolution spatiale des modèles a été significativement améliorée. Au niveau régional ou comme global, les progrès continus de la connaissance, la représentation des phénomènes climatiques et l'amélioration des techniques de calcul numérique ont permis d'aboutir récemment à une nouvelle

génération de modèles plus complets dits modèles planétaires ou en anglais Earth System Model (ESM) (Ly,2019).

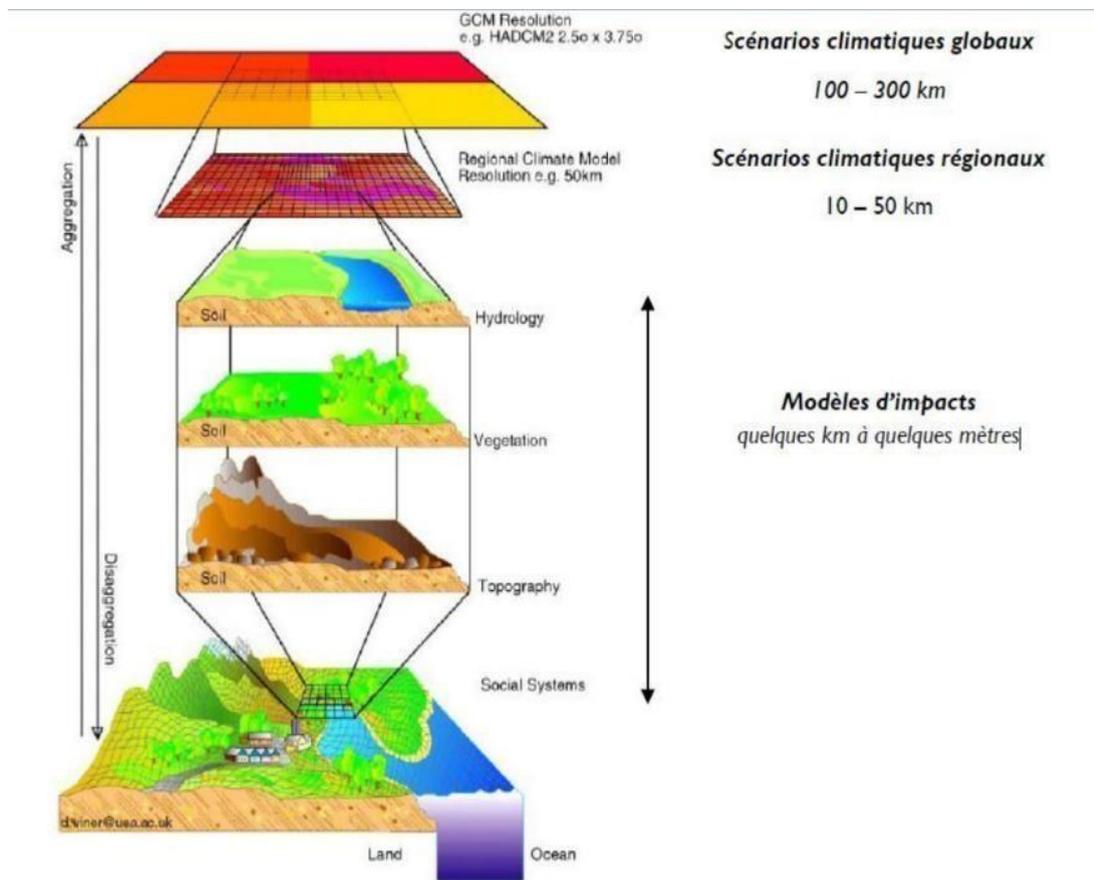


Figure I.9 : échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle

source: s.Planton

Evaluation de la performance des modèles climatiques régionaux

Au cours des dernières années, les MCR ont été largement utilisées pour fournir des simulations climatiques à haute résolution. Ces simulations sont toutefois sujettes à un certain nombre d'incertitudes provenant des conditions aux limites, de la taille du domaine d'intégration, de la variabilité naturelle au sein des MCR et de la formulation des MCR. Une condition préalable à l'utilisation des données de simulation climatique des MCR est l'évaluation par la comparaison des résultats du modèle avec les observations. Cela aide à évaluer la capacité des MCR à simuler les conditions climatiques à des endroits particuliers. Ceci est important pour l'évaluation et la quantification des incertitudes dans les simulations des modèles climatiques à utiliser dans les études d'impact sur le changement climatique et les

décisions politiques à différents endroits. Les résultats des MCR seront ensuite pilotés par les conditions aux limites des modèles climatiques globaux (MCG) et des données ERA-Intérim. Elles décrivent les variables atmosphériques à l'échelle globale sur une période allant de 1979 à nos jours et servent dans le travail à initialiser le MCR et comme jeu de données de comparaison permettant l'évaluation de la capacité du MCR à améliorer la simulation des champs climatiques.

Un grand nombre d'études antérieures ont fourni des évaluations détaillées des performances des MRC pour simuler la climatologie des précipitations et de la température. Dans ces études, cependant, les simulations des MRC ont été évaluées par rapport à des données quadrillées interpolées dérivées de mesures de station météorologique. Une autre étude récente est celle d'Endris et al. 2014, qui a évalué la performance des MCR de CORDEX dans la simulation des précipitations, couvrent en totalité les continents africain, australien, sud-américain, nord-américain et européen, où les résultats du modèle ont été comparés avec des jeux de données d'observation quadrillés à $0,5^\circ$ par résolution spatiale de $0,5^\circ$ obtenus par Global Climatic research unit (CRU) et le projet Global Climatology Precipitation (GPCP). Bien que les données quadrillées se soient révélées utiles pour l'évaluation de la performance des MRC, elles comportent un certain nombre de précisions et d'erreurs potentielles. Ces données utilisent l'interpolation dans l'espace et le temps pour combiner les données des stations météorologiques dans un panel d'observations équilibré sur une échelle ou une grille spatiale fixe (Auffhammer et al., 2013). Leur qualité dépend du nombre de stations météorologiques utilisées dans les processus d'interpolation et de la formule d'interpolation car différents schémas produisent des estimations différentes, en particulier pour les précipitations (Dell et al., 2014). Dans les pays en développement avec peu de stations météorologiques, la qualité des données maillées est discutable (Zeghoud, 2018).

La capacité des MCR à simuler les conditions climatiques à un endroit particulier peut être évaluée à l'aide de diverses techniques (Flato et al., 2013). Cependant, aucune technique d'évaluation individuelle ou mesure de performance n'est considérée comme suffisante, c'est plutôt l'utilisation combinée de nombreuses techniques et mesures qui fournissent une vue d'ensemble complète de la performance du modèle (Flato et al., 2013). Dans cette étude, les résultats des MCR sont évalués par rapport à des observations en utilisant certaines mesures statistiques recommandées par l'Organisation météorologique mondiale (OMM), comme indiqué (Gordon et Shaykewich, 2010). Ces statistiques comprennent le biais, l'erreur

quadratique moyenne (mean squared error MSE) et le coefficient de corrélation donnés dans les équations 1, 2 et 3.

- Le Biais

$$biais = \frac{1}{N} \sum_{Ni=1} (Fi - Oi) \dots\dots\dots(I.1)$$

- Racine de l'erreur quadratique moyenne

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{Ni=1} (Fi - Oi)^2} \dots\dots\dots(I.2)$$

- Le coefficient de corrélation

$$r = \frac{\sum_{Ni=1} (Fi - \bar{F})(Oi - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{Ni=1} (Oi - \bar{O})^2 \sum_{Ni=1} (Fi - \bar{F})^2}} \dots\dots\dots(I.3)$$

Où F et O sont respectivement les valeurs simulées et observées, tout en se référant aux paires simulées et observées et N est le nombre total de ces paires. Pour l'analyse des précipitations et pour une interprétation simple, des versions normalisées des équations 1 et 2, c'est-à-dire un biais normalisé (ci-après NBias) et une erreur quadratique normalisée (NRMSE).

Les deux paramètres statistiques sont donnés dans les équations suivantes :

$$Nbiais = biais_{moyobs} * 100 \dots\dots\dots(I.4)$$

$$NRMSE = RMSE_{moyobs} * 100 \dots\dots\dots(I.5)$$

Le *Nbiais* est une mesure en pourcentage de la sous-estimation ou de la surestimation globale d'une variable climatique particulière par les MCR. Les valeurs NBiais positives indiquent une surestimation tandis que les valeurs négatives indiquent une sous-estimation par le modèle climatique. D'autre part, le NRMSE est une mesure de l'erreur absolue du modèle climatique dans la simulation de certaines variables climatiques. Plus le NRMSE est petit, meilleur est le modèle et vice versa. Le coefficient de corrélation de Pearson est une mesure de la force de la relation entre les simulations du modèle et les observations et a les limites de 1 et -1. Un coefficient de corrélation de Pearson de 1 indique une corrélation positive parfaite

entre le modèle et les données observées, alors que -1 indique une corrélation négative parfaite entre les deux (Zeghoud, 2018).

Les simulations climatiques

Les simulations climatiques sont le produit final des modèles climatiques. Elles représentent le résultat de l'exécution d'un modèle climatique pendant une certaine période de temps. Comme indiqué précédemment, chaque modèle climatique a son propre ensemble d'équations pour représenter le système climatique. Pour obtenir une simulation climatique, de nombreuses données sont nécessaires en intrants dans un modèle climatique. Par exemple, un portrait détaillé de la surface de la Terre, y compris les données géophysiques (types de sol, les types de végétation, les contours continentaux, l'emplacement et la bathymétrie des grandes étendues d'eau, description de la topographie, etc.). En outre, comme abordés plus tôt, les scénarios d'émissions sont un facteur principal pour les modèles climatiques dans les études sur les changements climatiques. Différentes simulations climatiques sont obtenues puisque chaque modèle climatique réagit différemment aux scénarios d'émissions de GES, et donc produira un climat futur différent. Il est important de comprendre qu'aucun de ces climats futurs ne devrait être considéré comme une prédiction : tous les climats futurs prévus par les modèles climatiques avec différents scénarios de forçage de GES doivent être considérés comme tout aussi plausibles (Charron, 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 (figure I.10). 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 (figure I.10).

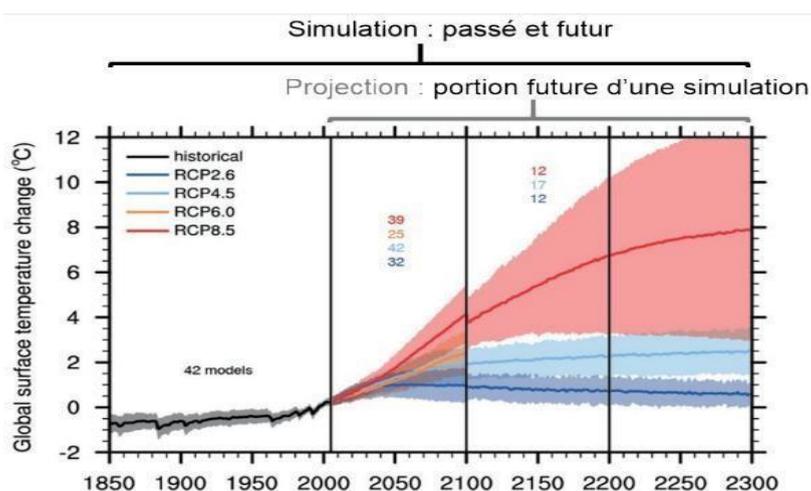


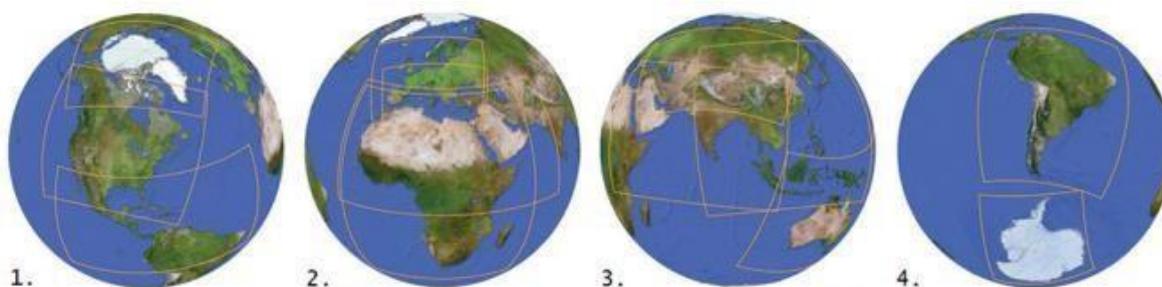
Figure I.10 : simulation passée et future (Source : IPCC 2013)

Présentation des MCR du projet CORDEX-AFRICA

Cordex est un projet international élaboré par le Programme mondial de recherche sur le climat. Il vise à étudier le climat régional et son évolution par la modélisation régionale. Il est soutenu par les plus grands centres de recherche internationaux sur le climat dont :

Météo-France, le Met Office (Angleterre), l'IPSL (Institut Pierre- Simon Laplace, France), le MPI (Max Planck Institute, Allemagne), le SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Suède) et d'autres, qui mettent en ligne sur une plateforme dédiée les résultats de leurs simulations. Lancé en 2010, Cordex met à disposition des simulations issues de modèles régionaux (MCR), eux-mêmes forcés par des modèles globaux (MCG), il permet ainsi de :

- comparer l'aptitude des différentes méthodes de régionalisation utilisées par les différents centres climatiques dans le monde à reproduire un climat de référence ;
- produire des **simulations de sorties climatiques régionales** sur 14 régions du globe : Amérique, Europe(EURO), Afrique (AFRICA, Méditerranée(MED), Moyen-Orient Afrique du nord(MENA), Asie..... .



Les domaines du projet Cordex : 1. Arctique, Amérique du Nord et Amérique centrale. 2. Europe, Méditerranée, Afrique du Nord-Moyen-Orient et Afrique. 3. Asie centrale, Asie du Sud et Asie du Sud-Est, Australasie. 4. Amérique du Sud et Antarctique. Source : Institut Pierre-Simon Laplace.

Fig I.11: les domaines du projet Cordex

Dans ce qui suit, nous présentons les MCR CORDEX-AFRICA, utilisées dans le cadre de notre travail.

- **Domaine de Cordex-Africa :**

Pour CORDEX-Afrique, la simulation a été réalisée sur la résolution de 0,44 ° (sa résolution est de 50km ce qui signifie que la grille tridimensionnelle restreinte donne un modèle plus détaillé et des projections futures plus proche de la réalité, les modèles régionaux de Cordex-Africa ne font la simulation des données que pour les deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.

- **Les modèles climatiques régionaux Cordex africa et leur désignation**

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 (Roeckner 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 I.3 : Modèles climatiques régionaux-CORDEX avec les modèles globaux associés

N	Modèle climatique régional (MCR)	Nom abrégé du modèle (MCR)	Modèle climatique globale (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

- **Utilisation pratique des modèles CORDEX-Afrique**

Le programme CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment) a été mis en place afin de produire des scénarios de changement climatiques fiables à des fins d'étude d'impact sur la plupart des terres émergées en utilisant des MCR de dernière génération et aussi de comprendre et analyser les incertitudes (Zeghoud, 2018).

Depuis le lancement du programme CORDEX Afrique (Jones et al , [2011](#)), quelques études ont évalué les performances des MCR sur certaines parties du continent, y compris l'Afrique australe (Nikulin et al , [2012](#) ; Kalognomou et al , [2013](#)). Des données mensuelles et saisonnières ont été utilisées pour évaluer la capacité des MCR à simuler les principales caractéristiques de la distribution saisonnière moyenne des précipitations et du cycle annuel des précipitations (shongwe, 2014).

En Algérie, l'utilisation des sorties de modèles climatiques a fait l'objet de certaines études. (Zeroual et al, 2018) ont fait un bilan du changement climatique en Algérie 1951-2098 et ils ont étudié 15 modèles climatiques régionales du CORDEX-africain en se basant sur les deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5) et enfin ils ont trouvé que les modèles RCA4-MPI-ESM-LR , CCLM4-8-17-CNRM-CM5, RCA4-IPSL-CM5A et RCA4-MIROC5 sont les plus performants (Bouabdelli et al. 2018) ont fait une analyse et prévision de la sécheresse dans le bassin versant du barrage de Beni-Bahdel situé au nord-ouest de l'Algérie, en utilisant huit simulations de la dernière version du modèle climatique régional de centre Rossby-RCA4 utilisé sous le programme CORDEX-Africa , de plus ils ont analysé les caractéristiques de sécheresse prévues sous les deux scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 pour la période future 2005 - 2100 , ils ont montré que le modèle le plus fiable est RCA4-IPSL-CM5A sous le scénario RCP8.5

Méthodes de correction des sorties de modèles climatiques régionaux

En Général, les données issues des simulations réalisées par des MCRs présentent des biais par rapport aux données observées. Ces biais diffèrent selon le MCR ou le type de donnée analysée.

Ainsi, afin de rendre utilisables les données des simulations provenant des MCRs pour une étude d'impact, une étape de correction de biais est nécessaire. Les données brutes simulées par les MCRs doivent être corrigées avant d'être utilisées pour des modèles d'impact. Parmi les méthodes de correction des biais couramment utilisées, la méthode du delta et la correction quantile-quantile.

Méthode du Delta

La méthode du delta consiste à relever les anomalies du MCR et de les appliquer aux données observées. Il s'agit de d'abord calculer le changement relatif (delta) entre les données simulées de la période future et la période de référence (figure 12B). Ce changement est ensuite appliqué aux données observées de la période de référence (figure 12D). Cette méthode peut se faire en utilisant deux approches : en calculant un changement moyen sur l'ensemble de la distribution des observations ou en utilisant les quantiles de la distribution.

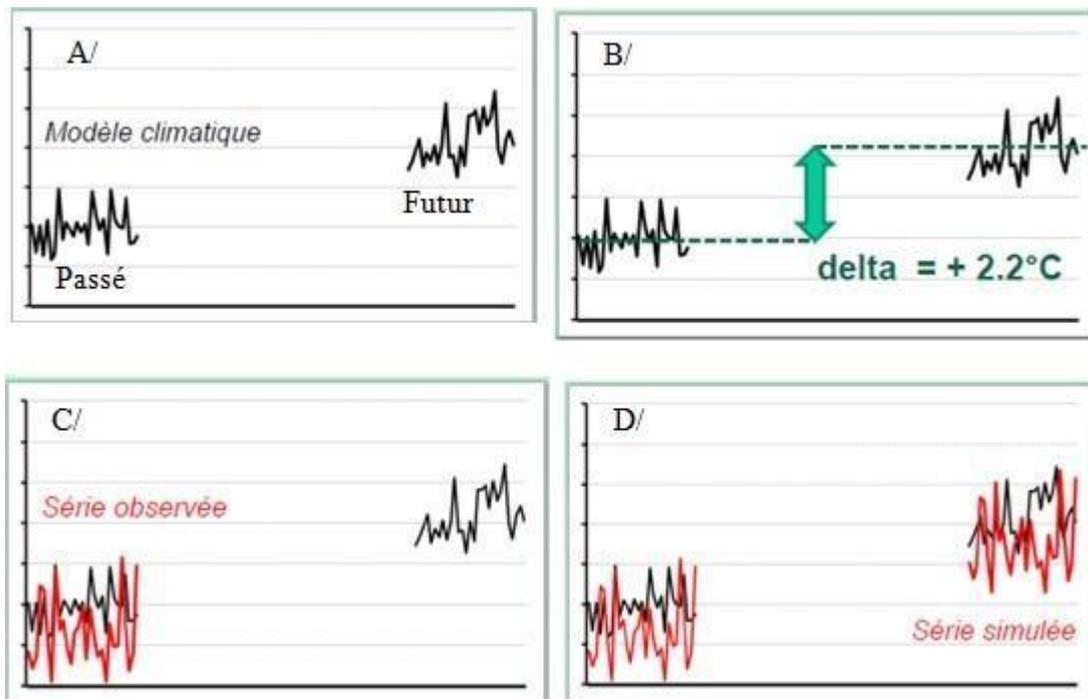


Figure I.12 : Exemple de la méthode de correction delta. Le changement relatif entre la période de référence et la période future est calculé (B) et appliqué à la série temporelle observée (D).

La méthode delta-changement génère des scénarios climatiques en ajoutant le signal de changement futur (anomalies) des simulations GCM-RCM pour une perturbation des jeux de données d'observation plutôt que d'utiliser les simulations GCM-RCM des conditions futures directement selon à:

$$P_{contr}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \quad (I.6)$$

$$P_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[\frac{\text{um P frc}(t)}{\text{um P contr}(t)} \right] \quad (I.7)$$

où P est les précipitations, $contr$ est la série temporelle simulée par GCM-RCM pendant la période de contrôle, obs est la série temporelle d'observation pendant la période de contrôle, frc est la série temporelle de prévision future à corriger, BC est la série temporelle finale corrigée du biais, t est le pas de temps et μ_m est la moyenne mensuelle à long terme.

Pour les scénarios de prévision futurs, les anomalies simulées par MCG-MCR entre les exécutions de contrôle et de scénario sont superposées à la série chronologique d'observation, qui est généralement effectuée sur une base mensuelle en utilisant une précipitation de correction multiplicative. Dans la méthode delta-change, des séries chronologiques d'observation sont utilisées comme base de référence, ce qui en fait une méthode robuste capable de corriger les valeurs moyennes. Néanmoins, l'écart type (variance), les fréquences humides et les intensités ne sont pas corrigés. Par définition, le DT ajuste parfaitement les séries temporelles simulées par GCM-RCM pendant l'étalonnage, mais les changements futurs potentiels dans la dynamique et la variabilité du climat ne sont pas pris en compte en raison de sa nature de transfert simple (Mendez et al,2020).

Méthode de correction 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 : elle améliore la distribution et la répartition des tendances mais le choix de la méthode ne semble pas être important pour la basse fréquence, elle permet seulement de corriger la moyenne(alkama,2011).

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 in :Colmet-Daage, 2019). Elle consiste à estimer la correction en fonction des quantiles de la distribution de probabilité de la variable en question. 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.

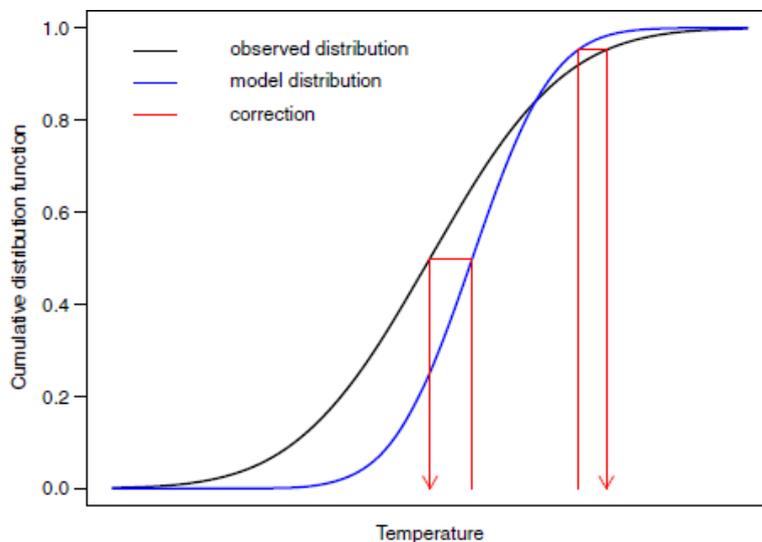


Figure I.13: Schéma des corrections de biais par quantile mapping.

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, 2016)

Chapitre II

➤ **Présentation de la zone d'étude**

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction

Le présent chapitre donne une description générale du bassin hydrographique du côtier oranais (Algérie) afin de donner les indications géographiques (relief), le climat dominant dans la région, ainsi que les variations des précipitations et de température sur l'ensemble de la région

Situation géographique de la zone d'étude

Le bassin Côtier Oranais fait partie de la région hydrographique Oranie- Chott Chergui qui se trouve à l'Ouest de l'Algérie. Le bassin des Côtiers Oranais est situé au Nord des bassins de la Tafna, la Macta et du Chott Chergui. Il est limité au Nord par la mer Méditerranée, dont l'altitude maximale varie de 1.061 m (Monts de Tessala) à 1021 m (Monts de Traras) et une altitude minimale de 15 m « au niveau de la frange côtière » (ABH-Oranie,2016).

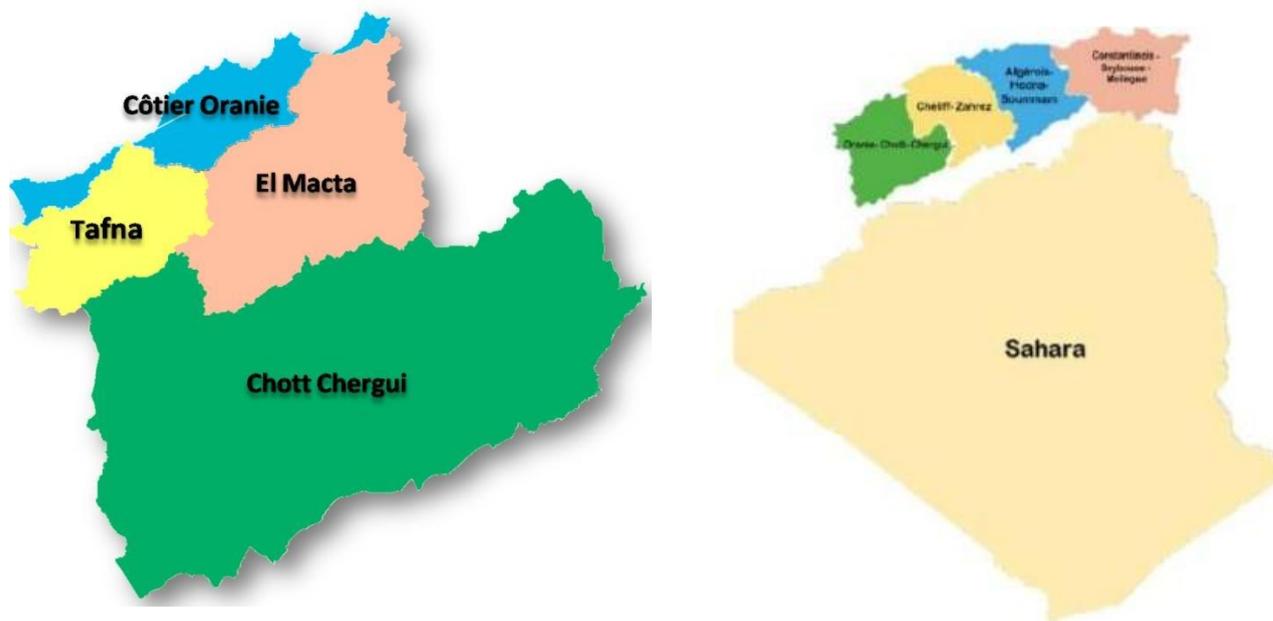


Figure II.1. Situation géographique du bassin côtier Oranais par rapport à la région hydrographique Oranie-Chott Chergui

source : ABH-Oranie-Chott Chergui

On distingue trois domaines géographiques :

- **Au Nord** : une zone montagneuse représentée par les massifs des Traras (Wilaya de Tlemcen), massif du Murdjadjo (Wilaya d'Oran)
- **Au Centre** : une zone intermédiaire de plaine (Plaine de Mleta wilaya d'Oran), et de plateaux intérieurs (Plateau de Mostaganem), les côtes de Hamoul (Wilaya d'Oran).
- **Au Sud** : les reliefs s'accroissent brusquement donnant les monts de Tessala. Selon le nouveau recensement général, la population du bassin Côtiers Oranais est de 2.247.832 habitants, répartis à travers 78 Communes. La superficie du bassin de l'Oranie est de 5842.08km², soit 8 % de la superficie totale de la région hydrographique.

Tableau II.1 :Tableau récapitulatif du bassin (Source ABH)

Code bassin	Wilaya intégrées totalement	Wilaya intégrées partiellement	Nombre de communes	Surface Km ²
04	Oran Ain Temouchent	Mostaganem Tlemcen Sidi Bel Abbes Mascara	85	5842.08

Le Relief

Le relief du bassin se présente de l'Ouest à l'Est comme suit :

a. Les zones montagneuses

- Monts des Traras :

C'est une chaîne montagneuse côtière de 1250 Km², qui occupe le Nord de la wilaya de Tlemcen (Côtier Occidental). Elle s'étend depuis l'embouchure de la Tafna jusqu'à la frontière Algéro – Marocaine.

- Monts de Tessala :

Constituent un massif complexe d'altitude moyenne de 800 m, où le point culminant atteint 1061 m (Pic de Tessala) à Djebel Bouhaneche.

b. Les zones des plaines intérieures

- La plaine de Brédéah :

Elle est limitée au Nord par le massif du Murdjadjo, à l'Ouest la plaine de M'Leta, à l'Est par le plateau des Hassis et par la Sebkha d'Oran au Sud.

- La Plaine de Boutlélis et Messerghin :

Aux pieds des monts du Murdjadjo alimentant les nappes du Murdjadjo et de Brédéah. L'écoulement sur ce versant disparaît souvent avant d'atteindre les terrains alluviaux des plaines et de la Sebkha et ce par infiltration à travers les terrains Karstiques du Murdjadjo.

- La plaine de la M'léta :

❖ Sous bassin: la plaine de M'léta appartient au sous bassin versant de la Sebkha d'Oran (0404), elle est limitée au Nord par la Sebkha d'Oran, au Sud par les monts du Tessala, à l'Est par la plaine de Habra-Sig et par la région de Hammam Bouhadjar-Ain Larbaa à l'Ouest.

- Plaine de Ain Temouchent-El Amria :

L'altitude moyenne de la plaine de Ain Temouchent-El Amria est de 300 m

c. La bande littorale

Elle fait partie de la chaîne Tellienne et est composée de :

- Massif Côtier de Beni Saf : Dont l'altitude moyenne est de 200 m le point culminant atteint 409 m au niveau du Djebel Skhouana.
- Plateau d'OuledBoudjema : d'une altitude moyenne de 350 m et est légèrement incliné vers la Sebkha .
- Plaine Côtière de Ain Turck : Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée et par le massif du Murdjadjo au Sud - Ouest .
- Plateau de Mostaganem : Occupe une superficie de 500 Km² . Il est limité au Nord par la mer, au Sud par les Monts de Beni Chougrane, à l'Est par la plaine du chéiff et à l'Ouest par la plaine de HabraSig.

Climatologie

Le Bassin des Côtiers Oranais est caractérisé par un climat Semi Aride Frais avec deux saisons prédominantes. Une saison humide qui s'étend du mois d'octobre au mois de Mai avec des pluies assez irrégulières, l'autre saison sèche s'étend du mois de Juin à Septembre avec une pluviométrie faible, le régime climatique se caractérise par des vents qui n'apportent

généralement que peu d'humidité. Lors de leur passage sur les reliefs Marocains et Espagnols, ces vents perdent une grande partie de leur humidité.

- **Pluviométrie**

Pour analyser la variabilité pluviométrique de la zone d'étude nous avons sélectionné cinq stations pluviométriques réparties sur l'ensemble de la zone d'étude (figure II.3). Les données mensuelles ont été collectées auprès de l'ANRH pour la période d'étude 1981-2010.

La pluie moyenne annuelle de la zone d'étude varie entre 248,86 mm à la station d'El braya à 352.69 mm à Oued berkeche. Effectivement, l'Ouest de l'Algérie est caractérisé par une pluviométrie inférieure à celle du centre et de l'Est du pays. C'est également la partie du pays qui a connu une longue période de sécheresse particulièrement au cours des années 80.

L'évolution annuelle des précipitations de la zone d'étude au cours de la période 1981-2010 montre une légère tendance à la hausse à partir des années 2000, ce qui signifie que l'intensité des sécheresses observées au cours des années 80 et 90 a diminué au cours des années 2000.

Le coefficient de variation varie entre 25% et 35%, ce qui met en évidence une forte variabilité temporelle des précipitations au cours de la période d'étude.

Tableau II.2 : caractéristiques géographiques et statistiques des stations pluviométriques de la zone d'étude

Code	Nom stations	X (km)	Y (km)	Z (km)	P. Moyenne (mm)	E-type	Cv
40203	Oued berkeche	165.1	220.2	450	352,69	93,18	26%
40301	Bousfer	180.4	273.3	84	317,05	92,52	29%
40405	Tamzourah	195.5	239.9	189	331,73	82,39	25%
40502	Oran pépinière	196.4	271.3	82	344,51	94,36	27%
40504	El braya	208.7	263.9	110	248,86	86,43	35%

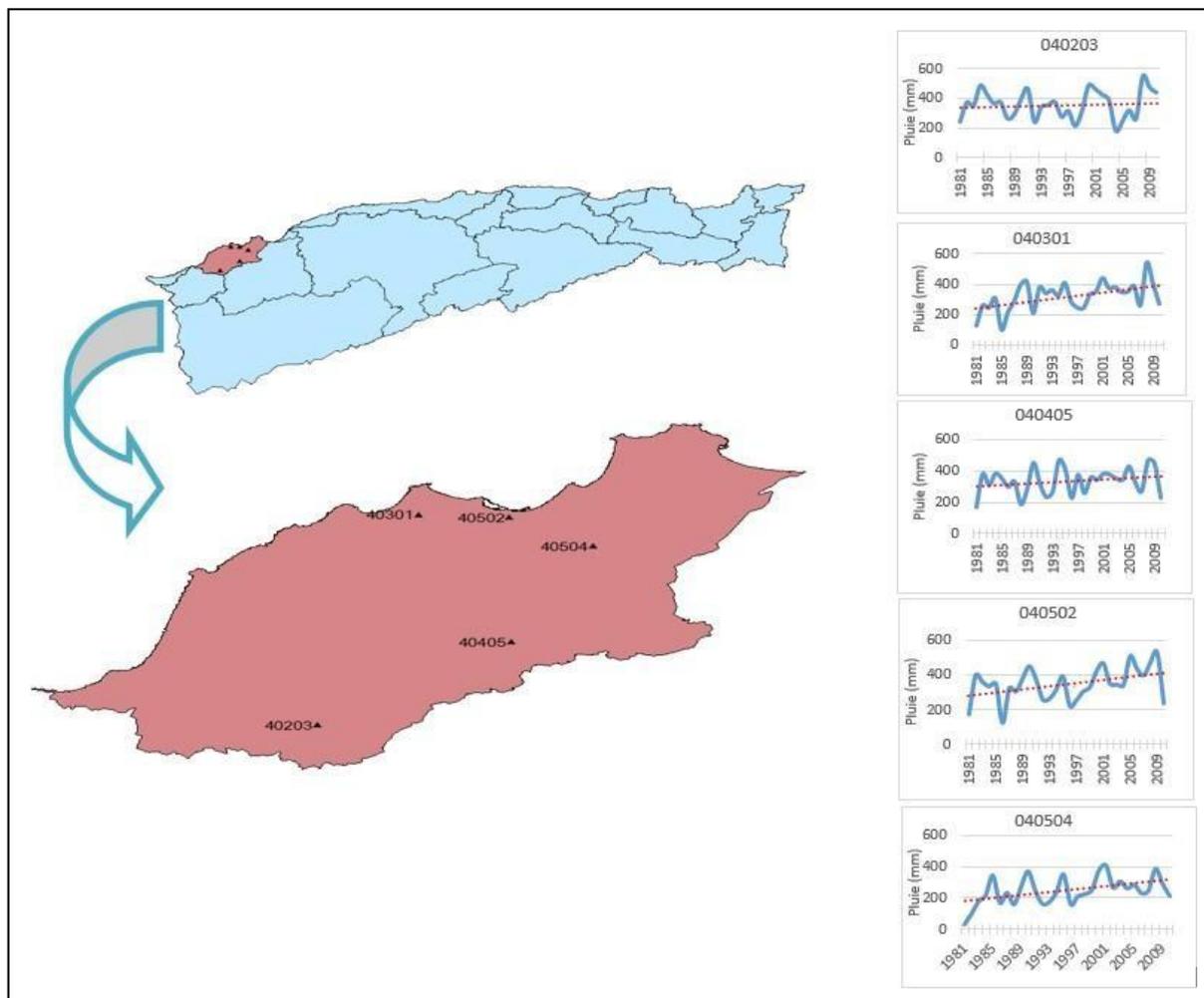


Figure II.2 : localisation géographique des postes pluviométriques et évolution des précipitations annuelles de chaque station au cours de la période 1981-2010

Tableau II.3 : Pluies moyennes mensuelles interannuelles des stations pendant la période (1981-2010)

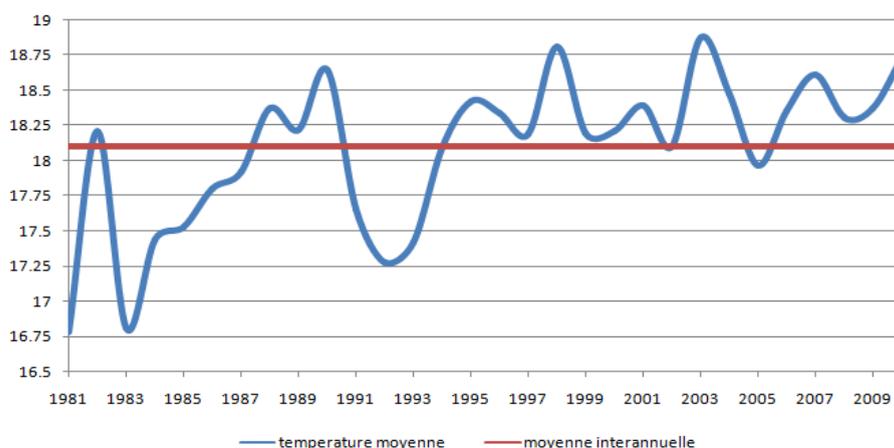
040203												
Mois	Sept	Oct	nov	Dec	Janv	Fevr	mars	Avr	mai	Juin	Juill	Aout
P	17.77	30.77	54.18	40.11	51.39	48.95	42.07	31.90	29.28	3.00	1.63	1.64
040301												
Mois	Sept	Oct	nov	Dec	Janv	Fev	mars	Avr	mai	juin	Juill	Aout
P	12.62	27.58	59.38	42.48	51.80	45.79	36.14	23.46	15.31	1.56	0.63	0.30
040405												
Mois	Sept	Oct	nov	Dec	Janv	fev	mars	Avr	mai	juin	Juill	Aout
P	15.54	28.94	55.52	38.92	44.98	43.56	40.20	30.88	27.57	2.53	0.86	2.24
040502												
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	mars	Avr	mai	juin	Juill	Aout
P	14.12	23.00	62.46	47.46	48.03	52.16	40.81	27.47	22.99	2.12	1.69	2.20
040504												
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	mars	Avr	mai	juin	Juill	Aout
P	10.43	21.41	43.20	32.77	37.69	32.17	27.15	22.56	19.23	0.99	0.22	1.04

• **Température**

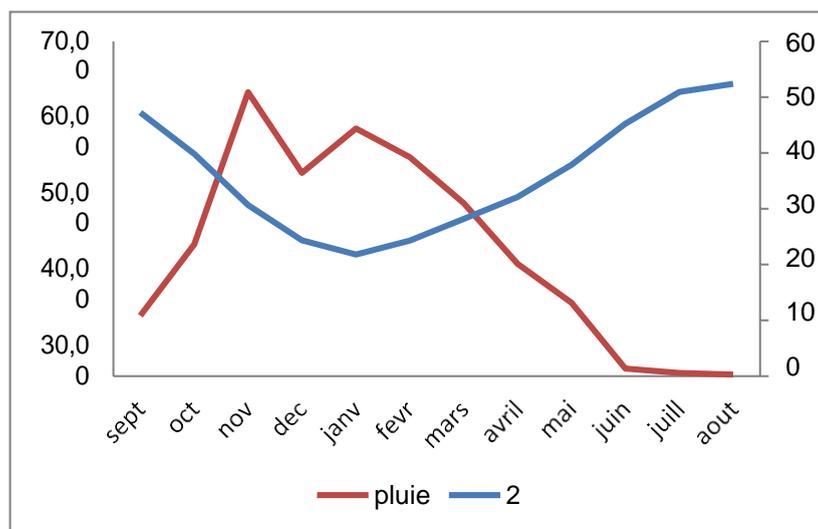
Les moyennes thermiques mensuelles mettent en évidence deux saisons bien tranchées de même durée : elles s'étendent sur 6 mois, de mai à octobre pour la saison chaude avec une moyenne de 27°C ou les maxima sont enregistrés en mois de juillet et août et de novembre à avril pour la saison fraîche avec une moyenne de 18°C.

Tableau II.4 : Données climatiques mensuelles interannuelles du côtier Oranais

Mois	Septemb	Octobre	Novembr	décembr	janvier	Février	Mars	avril	mai	Juin	Juillet	Aout
T°(23.61	19.88	15.3	12.12	10.84	12.10	14.09	16.03	18.9	22.58	25.41	26.14



FigII.3 : variation des températures annuelles au cours de la période 1981-2010 de la région d'oranais



FigII.4 : Diagrammes ombrothermique de la zone d'étude

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique des températures et quantités de précipitations moyennes mensuelles. Il comporte un axe horizontal où sont placés les 12 mois de l'année et deux axes verticaux, un à gauche pour les précipitations et l'autre à droite pour les températures.

Le diagramme ombrothermique (figure II.4) montre que la période humide s'étale d'Octobre à Mars dans la région d'étude.

Comme nous le voyons que pendant l'été ce milieu connaît une période de sécheresse. Les températures sont assez élevées, où elles sont à plus de 26°C. De plus les précipitations sont les plus importantes en automne avec un pic de 59,38mm enregistré en mois de Novembre.

Répartition des ressources en eau dans le bassin

Le réseau hydrographique du bassin côtier oranais couvre une superficie de 5842.08km² ; du point de vue hydrogéologique, on retrouve généralement des entités hydrogéologiques d'ampleur relativement limitée (tableau ci dessous) .

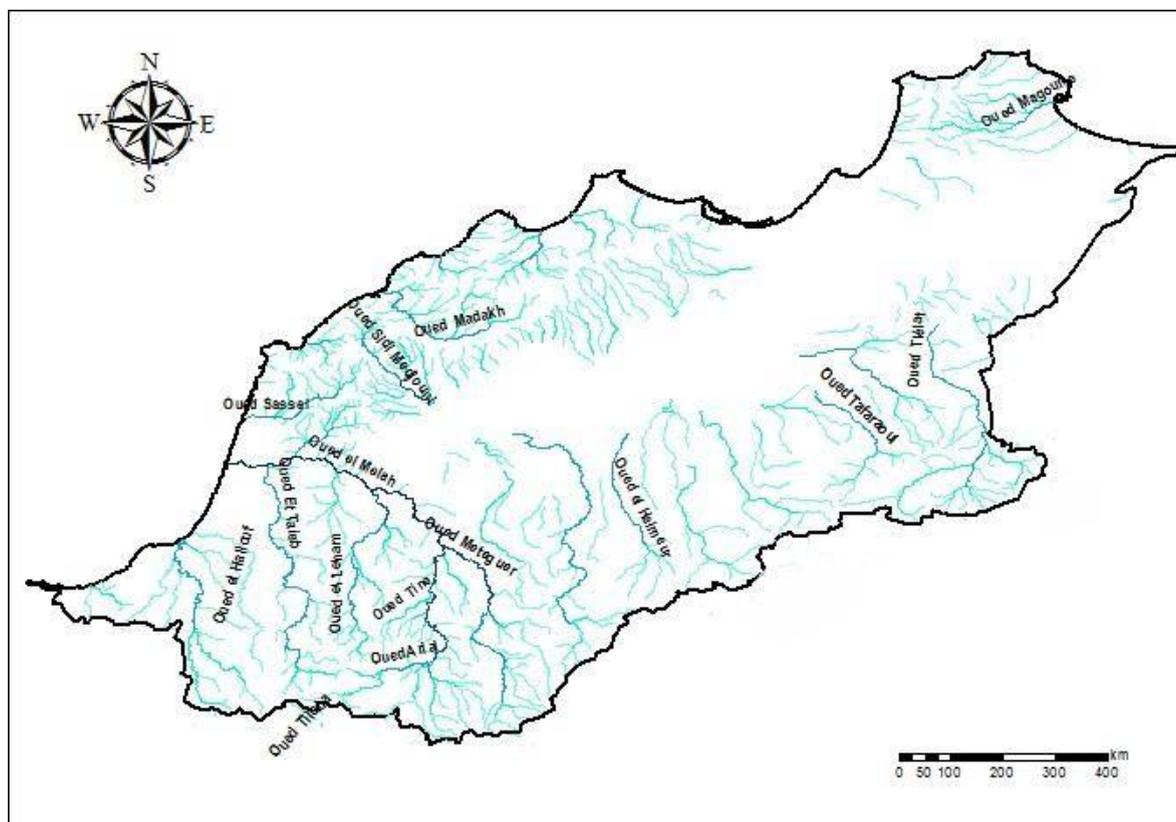


Fig II.5: l'hydrographie du bassin (arctgis,2020)

- **Potentialités en eau de surface :**

Les potentialités en eau superficielle sont estimées à 2.560 Hm³/an.

- **Potentialités en eau souterraine :**

L'approvisionnement des eaux souterraines se fait à partir des forages, puits et sources exploitées au niveau du Bassin versant ; les plus importantes nappes du bassin sont :

Tableau II.5 :Entités hydrographique et leur potentialité totale.

Nappes	Totale des potentialités
Plaine Ain Témouchent	Ces potentialités sont estimées à 96,6 Hm ³ .
Murdjadjo Sud	
Plaine de AinTurck	
Arbal	
Plateau des Hassis	
Plaine Brédéah	
Plaine de la Mléta	
Plateau de Mostaganem	

Chapitre III

➤ **Résultats et discussions**

Chapitre III: Résultats et discussions

Introduction

Ce chapitre présente les résultats de l'évaluation des performances de deux modèles climatiques régionaux CNRM et MPI du programme AFRICA-CORDEX ainsi que leurs projections futures pour la période 2074-2099. Les méthodes de correction de biais « quantile-quantile » et Delta ont été utilisées pour corriger les précipitations simulées par les deux modèles et améliorer ainsi la qualité des simulations futures afin de pouvoir proposer les mesures d'adaptation adéquates pour faire face aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eau.

Evaluation des performances des MCR Cordex-Afrique

Pour estimer les performances des modèles climatiques régionaux CNRM et MPI, on a été face à comparer entre les données simulées des précipitations et celles observées au cours de la période de contrôle (1981-2005). Les MCR fournissent des données simulées passées pour la période de 1951 à 2005. Selon la disponibilité des données observées nous avons opté pour la phase 1981-2005 comme une période de référence.

La comparaison entre les données observées et les données simulées se fait par le calcul du biais :

$$\text{BIAIS} = \frac{\text{Pluie simulée} - \text{pluie observée}}{\text{pluie observée}}$$

La représentation du cycle saisonnier des précipitations observées et celles simulées par les modèles CNRM et MPI pendant la période (1981-2005) montre pour les 05 stations réparties sur la zone du côtier oranais que :

- les modèles CNRM et MPI indiquent la même variation saisonnière des précipitations. ainsi, les pluies simulées sont plus importantes en période humide (Octobre-Mars) et plus faibles en période sèche (Avril-septembre) (figure III.1).
- Les modèles CNRM et MPI ont du mal à reproduire les précipitations mensuelles observées à l'échelle du bassin du côtier oranais (figure 01), le biais estimé en cette période entre les pluies observées et simulées enregistre en moyenne une variation de -6% à -70% (tableau 01), en hiver (environ -65%) et dépasse -50% à l'échelle annuelle. Ceci montre que les modèles CNRM et MPI sous-estiment fortement les précipitations

à l'échelle du bassin du Côtier oranais. En période sèche le biais connaît une augmentation considérable et ce revient au déficit pluviométrique en cette période.

- La formation des précipitations fait intervenir de très nombreux processus, la plupart se produisent à toutes petites échelles. Leur modélisation dans les modèles climatiques planétaires nécessite de nombreuses approximations, et les précipitations demeurent une des grandeurs que les modèles ont le plus de difficulté à simuler correctement.
- Le biais estimé en période sèche est très élevé par rapport à celui de la période humide, il dépasse souvent 100% et peut atteindre 1000%, Ceci s'explique par les faibles quantités de pluies qui tombent au cours de cette saison. Par exemple pour le mois de juillet les pluies moyennes observées peuvent ne pas dépasser 1mm alors que la pluie simulée par le modèle est de 4 mm ce qui donne un biais de 300%.
- On constate que le biais annuel le plus faible est observé à la station de Bousfer (040301). Il est de -3% avec le modèle CNRM et -5% avec le modèle MPI. Ceci s'explique du fait que les modèles climatiques sont de plus en plus performants qu'on se rapproche de la mer, contrairement aux autres stations qui sont un peu plus vers l'intérieur et dont le biais annuel dépasse 40%.

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

Tableau III.1: le biais estimé entre les pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2005

040203	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	annuel
CNRM	-27%	-24%	-64%	-53%	-63%	-58%	-39%	-21%	-55%	219%	204%	171%	-45%
MPI	-38%	-12%	-62%	-42%	-53%	-52%	-42%	-50%	-53%	93%	11%	-38%	-45%
40301	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	annuel
CNRM	28%	39%	-36%	3%	-37%	-23%	4%	80%	4%	446%	430%	825%	-3%
MPI	37%	28%	-44%	21%	-20%	-17%	-7%	36%	3%	230%	119%	37%	-5%
040405	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	annuel
CNRM	11%	-32%	-65%	-58%	-59%	-57%	-41%	-22%	-46%	332%	857%	245%	-40%
MPI	-6%	-24%	-61%	-46%	-52%	-52%	-41%	-50%	-47%	257%	358%	-6%	-41%
040502	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	annuel
CNRM	-42%	-8%	-67%	-53%	-32%	-69%	-51%	-33%	-66%	89%	8%	-25%	-51%
MPI	-37%	-16%	-71%	-46%	-52%	-66%	-56%	-49%	-66%	14%	-56%	-37%	-56%
040504	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	annuel
CNRM	-38%	-21%	-60%	-49%	-64%	-59%	-37%	-24%	-58%	252%	1065%	99%	-47%
MPI	-23%	-33%	-63%	-34%	-53%	-53%	-40%	-47%	-57%	137%	282%	-23%	-47%

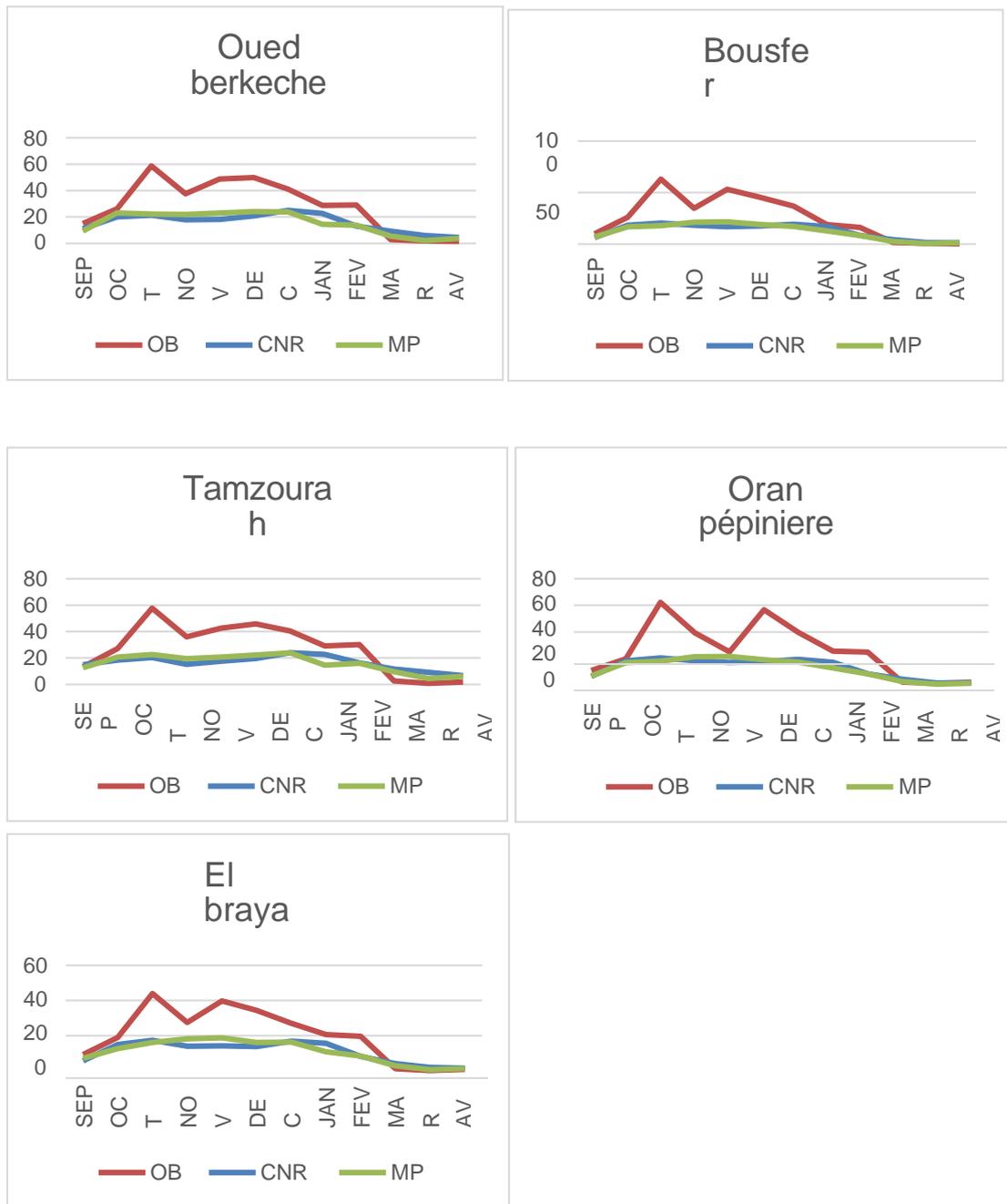


Figure III.1: Représentation du cycle saisonnier par les modèles climatiques

Evolution future des précipitations simulées par les MCR

Les modèles CNRM et MPI produisent 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 nous avons comparé les données simulées au cours de la période de projection 2074-2099 avec celles des simulations passées au cours de la période de contrôle 1951-2005 (figure III.1)

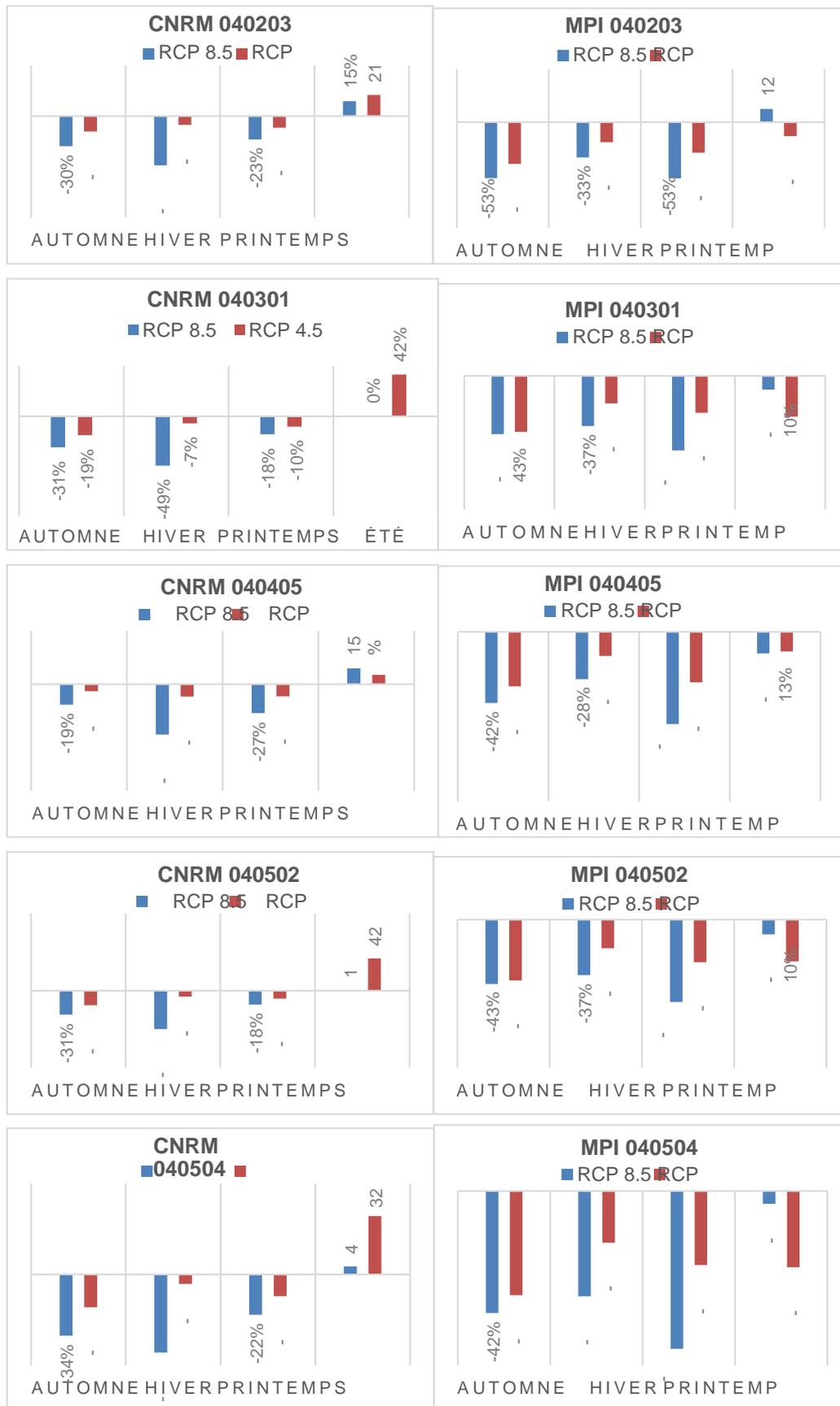


Figure III.2. Différence entre les pluies passées (1981-2005) et futures (2074-2099) simulées par les modèles MPI et CNRM pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

Selon le scénario RCP 4.5, le modèle CNRM indique une diminution des précipitations d'ici la fin du 21^{ème} siècle comprise entre 7% et 19% en automne, 5% et 12% en hiver et entre 10% et 12% au printemps. Alors que le modèle MPI simule pour la même station une diminution plus importante des précipitations, elle varie entre 32 et 46% en automne, 14 et 21 % en hiver et entre 25 % et 30% au printemps.

Le scénario pessimiste RCP 8.5 simule une réduction de la pluviométrie plus importante que le scénario pessimiste. Le modèle CNRM simule une réduction des précipitations pour l'ensemble des stations qui varie entre 19% et 34% en automne, 43% et 50% en hiver, et 18% et 27 % au printemps. Le modèle MPI montre également des réductions plus importantes des précipitations au cours de la période 2074-2099 qui varient entre 42 et 53% en automne, 28 et 37% en hiver, et dépassent 50% au printemps.

III. Correction de biais des précipitations simulées

L'analyse de la variabilité passée des précipitations issues des sorties de modèles climatiques CNRM et MPI a mis en évidence des biais importants pour la majorité des stations et aux différents pas de temps 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 utilisées afin de corriger et d'affiner les simulations des deux MCR.

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 III.1).

Pour comparer entre les deux méthodes nous avons calculé un coefficient d'échange entre les pluies simulées future corrigées et les pluies observées au niveau de chaque station.

Comme la période sèche montre des biais très importants de précipitations ce qui risque d'influencer les biais annuels. On se propose, à cet effet, d'analyser la variabilité future des précipitations uniquement pour la période humide de la zone d'étude (Octobre-Mars) puisque les quantités de pluies les plus importantes qui participent aux écoulements tombent au cours de cette période.

Les résultats montrent que les précipitations simulées après correction du biais sont nettement supérieures aux données brutes au cours de la période de projection 2074-2099 (figure III.3 B-C). Tout simplement parce qu'elles ont été corrigées par rapport aux pluies observées qui sont

fortement sous-estimées par les modèles CNRM et MPI au cours de la période de contrôle 1981-2005 (figure III.3-A).

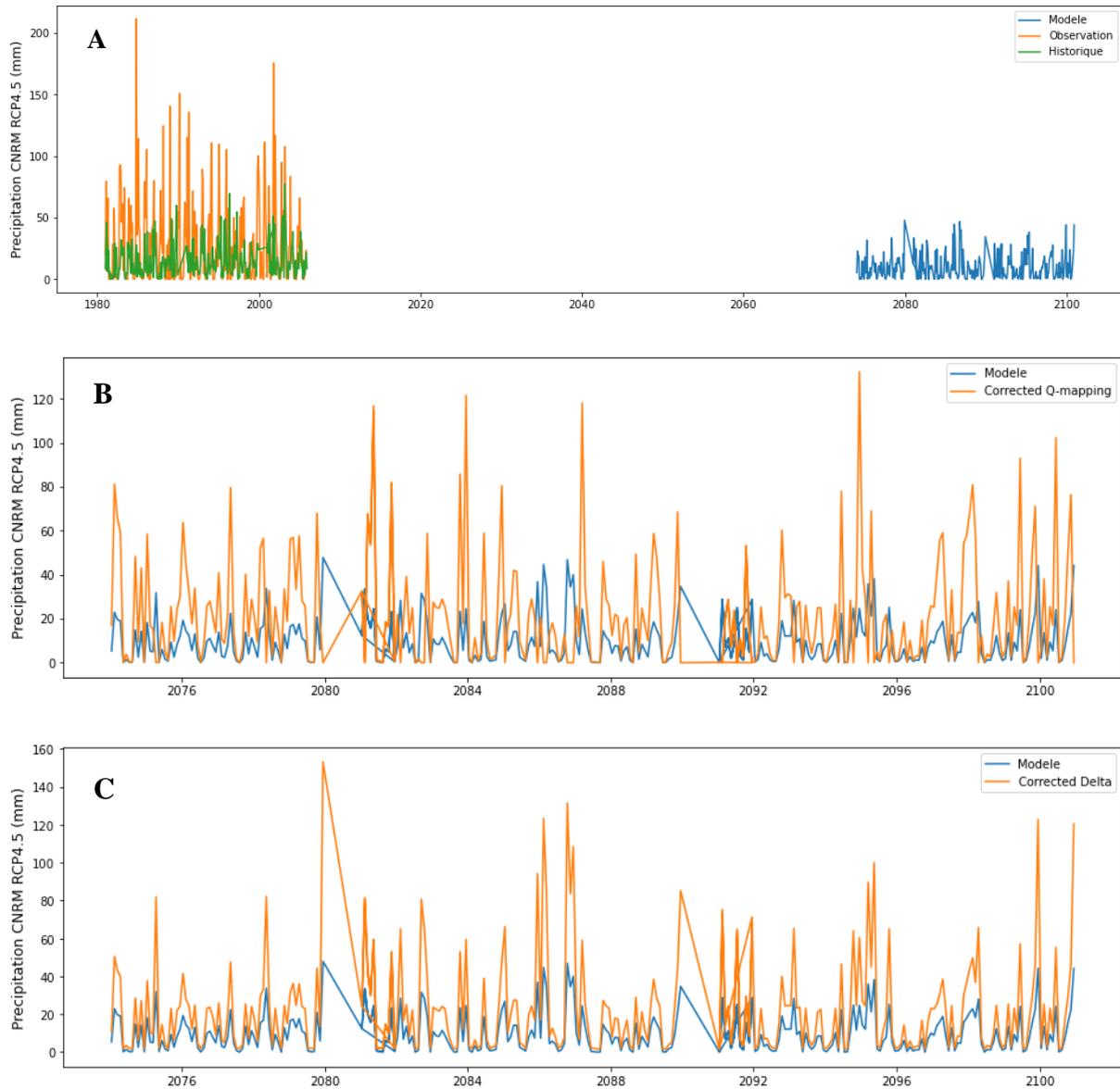


Figure III.3 : Différence entre les pluies observées et simulées (A), simulations futures après correction du biais par q-q (B) et delta (C) : Cas du modèle CNRM, RCP 4.5 pour la station de Bousfer-

De manière générale, il apparaît que les simulations futures corrigées par la méthode Delta sont les moins biaisées par rapport aux simulations corrigées par la méthode quantile-quantile (figure III.4).

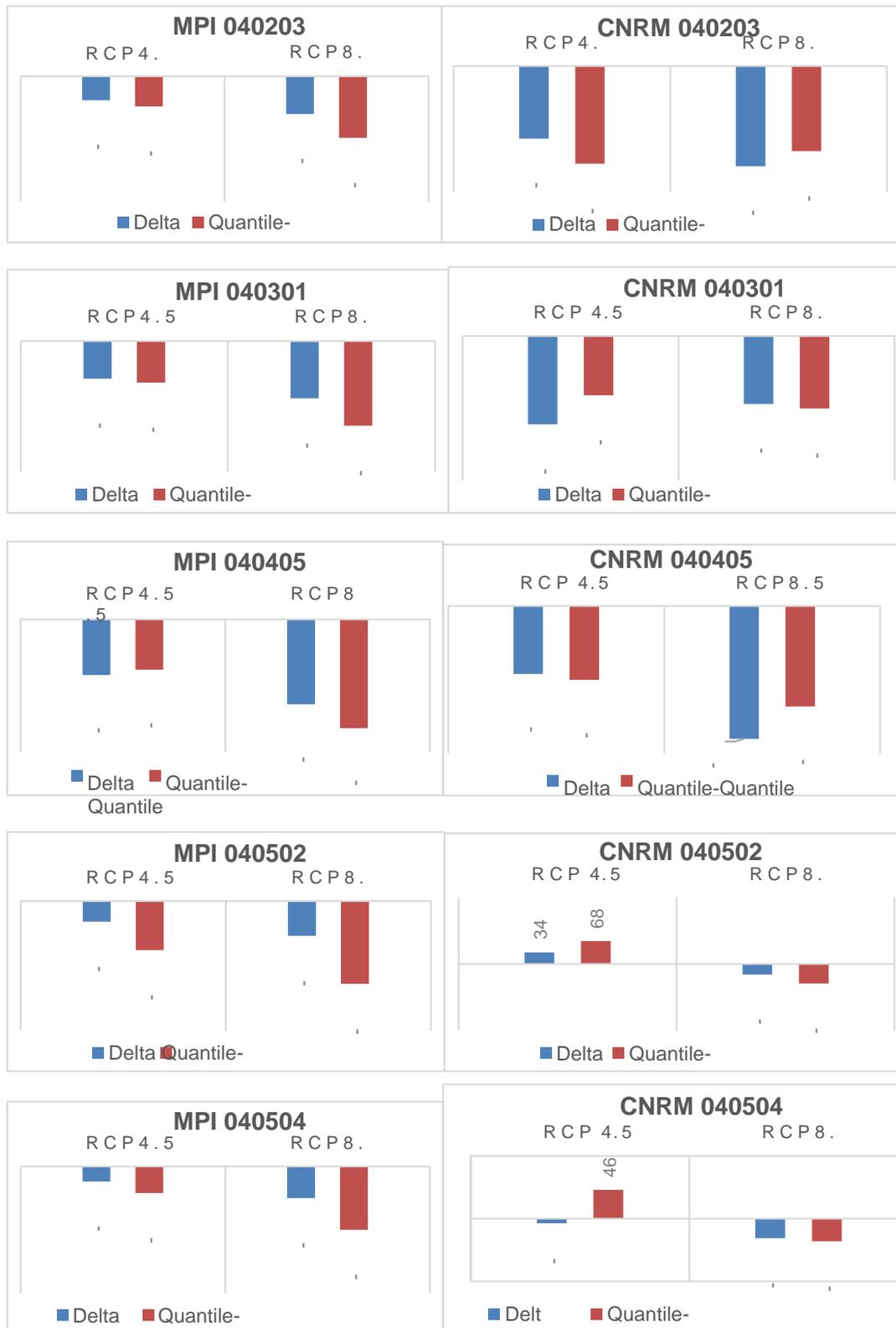


Figure III.4: Variation des précipitations futures (2094-299) par rapport aux observations (1981-2005) après correction de biais par la méthode Delta et Q-Q

Concernant le modèle MPI et pour le scénario climatique RCP 4.5, les variations des précipitations simulées au cours de la période 2074-2099 sont pratiquement similaires pour les deux méthodes de corrections et montrent une diminution de la pluviométrie qui oscillent entre 19% et 38%. Pour le RCP 8.5, les deux méthodes de correction montrent des variations différentes des précipitations pour l'ensemble des stations qui oscillent entre -27% et -47% pour la méthode Delta et entre -41% et -65% pour la méthode Q-Q.

Concernant le modèle CNRM et pour le RCP 4.5 une diminution de 7% à 61% est simulée par la méthode delta excepté pour la station 040502 qui montre une augmentation de 34%, tandis que les simulations issues de la méthode Q-Q montrent une diminution des précipitations de 25 à 41% excepté pour les stations 040502 et 040504 qui indiquent respectivement une augmentation de 68% et 48% des précipitations d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Pour le RCP 8.5, les projections futures corrigées par la méthode delta montrent une réduction des précipitations de 31% à 47%, alors que la méthode Q-Q simule une réduction de 34% à 59% des précipitations d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude de l'évolution des précipitations selon des scénarios de changements climatiques permet d'anticiper sur les mesures d'adaptation adéquates pour faire face à ce phénomène.

C'est ainsi, que ce travail a eu pour objectif d'analyser la variabilité future des précipitations dans le bassin côtier oranais. Cette région du pays a connu dans le passé une sécheresse intense et persistante qui a duré plus de 25 ans (1975-2001), ce qui a eu des conséquences considérables sur la disponibilité des ressources et affecter par conséquent le développement socio-économique de la région.

Cinq stations représentatives du côtier oranais ont été sélectionnées pour mener cette étude qui consiste à évaluer les performances de deux modèles climatiques régionaux CNRM et MPI du programme AFRICA-CORDEX à reproduire la variabilité pluviométrique passée de la zone d'étude au cours de la période de référence 1981-2005. Les données simulées futures sont ensuite corrigées à l'aide des méthodes quantile-quantile et delta pour analyser leur évolution au cours de la période de projection 2074-2099.

L'évaluation des modèles climatiques au cours de la période de contrôle par l'estimation du biais a montré des écarts importants de presque 50% entre les simulations et les observations pour l'ensemble des stations excepté pour la station de Bousfer, du fait de sa proximité de la mer, les simulations sont de meilleure qualité. A cet effet une correction du biais a été appliquée pour corriger les simulations des modèles climatiques par rapport aux observations.

Les résultats ont montré de manière générale, que les deux méthodes de correction donnent des résultats différents pour la même station particulièrement pour le modèle CNRM, contrairement au modèle MPI. Les coefficients d'échange estimés entre les observations et les simulations futures indiquent que les simulations futures corrigées par la méthode Delta sont les moins biaisées par rapport aux simulations corrigées par la méthode quantile-quantile.

Les prévisions des précipitations pour la période de projection 2074-2099 montrent dans l'ensemble que le scénario RCP 4.5 simule une réduction de la pluviométrie pour la majorité des stations qui est encore plus importante selon le scénario pessimiste RCP 8.5.

Si on tient compte des résultats les plus optimistes, les modèles climatiques simulent en moyenne une réduction de 15% à 40% des précipitations d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Cette sécheresse météorologique va provoquer une sécheresse hydrologique qui va engendrer à son

tour une sécheresse agricole. La disponibilité des ressources en eau pour satisfaire les besoins des différents usagers risquent de diminuer significativement particulièrement face à une population croissante et dont les exigences ne cessent d'augmenter.

Ce travail peut contribuer à la mise en place d'un outil d'aide à la planification pour élaborer un plan d'actions fonctionnel pour la gestion des ressources en eau et le suivi des sécheresses dans le bassin côtier oranais pour faire face aux conséquences néfastes du réchauffement climatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- **Anza ,F.Z** , Impact des changements climatiques sur les écoulements du barrage de Ain Dalia wilaya de Souk Ahras,memoire master,université Blida 01,2019, pp62
- **Alpert ,P., Ben-Gai, T., Baharad ,A et al**, The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values, Geophysical Research Letters, vol. 29, no. 11, pp. 1–31, 2002
- **Charron,I**, Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, p88, 2016 Disponible sur <<https://www.ouranos.ca>>
- **Dubrovský ,M., Hayes, M., Duce, P., Trnka ,M., Svoboda ,M., and Zara, P**, Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region, Regional Environmental Change, vol. 14, no. 5, pp. 1907–1919, 2014
- **Farah ,A**, Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien, mémoire Magister, universite constantine 1,pp.127,2014 disponible sur <<https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/FAR6649.pdf>>
- **Giannakopoulos, M., Bindi ,M., Moriondo, M., and Tin, T**, Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise, A Report for WWF
- **Hermès, M. N**, Etude d'impact de la variabilité climatique sur la schistosomiase dans la zone de santé de Katana, Sud- Kivu en RDC, Mémoire licence, Université ouverte campus de Bukavu,2008 disponible sur <https://www.memoireonline.com/12/13/8139/m_Etude-d-impact-de-la-variabilite-climatique-sur-la-schistosomiase-dans-la-zone-de-sante-de-Katana1.html>
- **Jebari ,S., Berndtsson, R. R., Lebdi, F., and Akissa Bahri ,A, Sediment**, discharge and precipitation variation in the wadi Mellegue catchment during the 50 past years, Actes des dixièmes Journées Scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 21-22 novembre 2007 Exploitation des ressources en eau pentru une agriculture durable, Annales de l'INRGREF, vol. 11, pp. 116–122, 2008

- **Khomsî ,K., Mahe, G., Trambly ,Y., Sinan, M., and Snoussi ,M,** Trends in rainfall and temperature extremes in Morocco, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, vol. 3, no. 2, pp. 1175–1201, 2015
- **Krichak ,S. O., Breitgand, J. S., Samuels, R., and Alpert, P,** A double-resolution transient RCM climate change simulation experiment for near-coastal eastern zone of the Eastern Mediterranean region, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 103, no. 1, pp. 167–195, 2011
- **Laignel ,B .,Nouaceur ,Z., Jemai,H., Abida .H., Ellouze,M. , and Turki,I .** Vers un retour des pluies dans le nord-est tunisien? in *Proceedings of the Actes du XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie-2* au 5 Juillet 2014, pp. 727–732, Dijon, France, 2014. Disponible sur < Google scholar >.
- **Ly, M., Segnon,A.C., D'haen, S., Totin,E., Noblet, M., Camara, I., Pfliederer, P,** Comprendre et interpreter les sorties des modeles climatiques pour la conduite des etudes de vulnerabilite: Guide a l'attention des praticiens, *Climate Analytics*, pp.21 ,2019 disponible sur <https://climateanalytics.org/media/pas-pna_guide_mod_lisation_va_fr.pdf>
- **Mahi ,E,** Etude des Caractéristiques Morpho métriques du bassin versant des côtiers oranais,mémoire master,Centre Universitaire Belhadj Bouchaib - Ain Temouchent- ,2017pp.93,disponible sur <<http://pmb-int.cuniv-aintemouchent.dz/memoire> >
- **Maikel,M.,Ben, M.,David,H.,Griggs,L.F.,Alvarado,G,** Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica,*journal water*,pp.34,2020
Disponible sur <<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/482/htm>>
- **Mxolisi,E..Shongwe,C.,Lennard,B.,Liebmann,E.A.,Kalognomou,L.,Ktsangwane,I .P,** An evaluation of CORDEX regional climate models in simulating precipitation over Southern Africa,*journal of atmospheric science letters*,pp.9,2014
disponible sur < <https://doi.org/10.1002/asl2.538>>

- **Norrand-Romand ,C. and Douguédroit ,A**, Significant rainfall decreases and variations of the atmospheric circulation in the Mediterranean (1950–2000), *Regional Environmental Change*, vol. 14, no. 5, pp. 1725–1741, 2014.
- **NOUACEUR,Z ., LAIGNEL,B et TURKI,I**, Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ?,*article physio-géo*,2013 ,p. 307-323
- **Nouaceur,Z**, Rainfall Variability and Trend Analysis of Annual Rainfall in North Africa,*article« internationaljournalof atmospheric sciences »*,pp.13,2016
diponible sur< <https://www.hindawi.com/journals/ijas/2016/7230450/>>
- **Philandras ,C. M., Nastos, P. T., Kapsomenakis, J., Douvis ,K. C., Tselioudis ,G., and Zerefos ,C. S**, Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 12, pp. 3235–3250, 2011.
- **Philandras C.M., Nastos P. T., Kapsomenakis J., Douvis K. C., Tselioudis G., Zerefos C.S**,Tendances des précipitations à long terme et variabilité au sein de la la régionméditerranéenne, n.11, p. 32-35,2011,
- **Planton,S., Déqué, M., Douville,H., and Spagnoli,B**, Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 337, no. 1, pp. 193–202, 2005.
- **Ramdan,A**, l'évolution actuelle des précipitations continentales au niveau global, pp,14,2011.
- **Richard,M** , Towards New Scenarios for Analysis of Emissions,*Climate Change,IntergovernmentalPanelonClimateChange*,pp. 132 , 2008.
disponible sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sc%C3%A9nario_RCP#cite_note-2>
- **Seidou,O**, Evaluation de la performance des modèles climatiques sur le niger,pp.65,2017 disponible sur <<http://racines-sahel.org/bibliotheque-numerique/files/original/e38dcdd3e1de944bfae25039125f1da2.pdf>>
- **Taibi,s** , Analyse et modélisation hydrologique, Cours de Master 1, Université de Blida 1,2017

- **Tselioudis, G., Zerefos, C., Zanis, P., Repapis, P., and Kapespmenakis, I.**, Future trends in Mediterranean precipitation and possible connections with the phase of the North Atlantic Oscillation, in Proceedings of the 9th Conference of Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, pp. 513–520, Thessaloniki, Greece, May, 2008.
- **Veronique, D.**, Les risques hydrométéorologiques en Méditerranée, conférence, 12/12/2016. Disponible sur <<https://www.youtube.com/watch?v=VRzo8IxXik&t=250s>>
- **Yidourega, D.**, Changements climatiques et cultures maraichères, Mémoire Master, Université d'Ouagadougou, 2009. Disponible sur <memoireonline.com>
- **Zeghoud, F.**, Evaluation de la performance des modèles climatiques régionaux CORDEX dans la simulation des conditions climatiques actuelles au nord de l'Algérie, mémoire master, École Nationale Supérieure d'Hydraulique(ENSH), pp.89, 2018
Disponible sur <http://library.ensh.dz/images/site_lamine/pdf/these_master/2018/6-0015-18.pdf>

Webographie:

- <https://www.youtube.com/watch?v=3kSk5EOx5DI>
- <https://cig.uw.edu/learn/climate-change/>
- https://www.mdpi.com/journal/water/sections/Hydrology_Hydrogeology
- <https://www.skepticalscience.com/climate-models-intermediate.htm>
- <https://www.youtube.com/watch?v=3kSk5EOx5DI>
- <https://www.ipcc.ch/>
- <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/rapport-special-2018-du-giec>
- <https://public.wmo.int/fr>
- <https://www.noaa.gov/>

ANNEXE

Biais des données simulées et observées passées sur la période « 1981-2005 »

• **Modèle CNRM**

	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Annuel
040203													
SIM	11.06	20.08	21.32	17.84	18.12	20.71	25.06	22.69	13.10	9.25	5.84	4.41	189.5
OBS	15.19	26.28	58.75	37.67	48.78	49.89	41.13	28.89	29.15	2.90	1.92	1.63	342.2
BIAIS	-27%	-24%	-64%	-53%	-63%	-58%	-39%	-21%	-55%	219%	204%	171%	-45%
040301													
SIM	6.47	18.32	20.51	18.40	16.97	17.70	19.41	17.16	8.50	4.43	1.61	1.69	151.2
OBS	9.99	25.97	62.96	34.79	53.18	45.25	36.83	18.81	16.16	1.60	0.60	0.36	306.5
BIAI	-35%	-29%	-67%	-47%	-68%	-61%	-47%	-9%	-47%	177%	168%	369%	-51%
040405													
SIM	14.87	18.46	20.33	15.26	17.52	19.65	24.03	22.67	16.33	11.59	9.19	6.69	196.6
OBS	13.39	27.24	57.83	36.10	42.80	45.96	40.51	29.21	30.19	2.68	0.96	1.94	328.8
BIAIS	11%	-32%	-65%	-58%	-59%	-57%	-41%	-22%	-46%	332%	857%	245%	-40%
040502													
SIM	6.47	18.32	20.51	18.40	16.97	17.70	19.41	17.16	8.50	4.43	1.61	1.69	151.2
OBS	11.10	19.96	62.32	39.31	25.00	56.77	39.73	25.62	24.94	2.35	1.49	2.25	310.8
BIAIS	-42%	-8%	-67%	-53%	-32%	-69%	-51%	-33%	-66%	89%	8%	-25%	51%
040504													
SIM	5.75	15.04	17.43	14.04	14.29	13.93	16.98	15.69	8.28	4.19	1.98	1.63	129.2
OBS	9.25	18.93	43.96	27.54	39.76	34.38	27.06	20.56	19.7	1.19	0.17	0.82	243.3
BAIS	-38%	-21%	-60%	-49%	-64%	-59%	-37%	-24%	-58%	252%	1065%	99%	-47%

- Modèle MPI

040203	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	annuel
SIM	9.47	23.19	22.32	21.97	23.05	24.17	23.91	14.56	13.8	5.61	2.14	3.77	187.96
OBS	15.19	26.28	58.75	37.67	48.78	49.89	41.13	28.89	29.15	2.90	1.92	1.63	342.18
BIAIS	-38%	-12%	-62%	-42%	-53%	-52%	-42%	-50%	-53%	93%	11%	131%	-45%
040301	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Annuel
SIM	6.94	16.84	17.92	21.28	21.56	19.04	17.32	12.96	8.42	2.67	0.66	1.46	147.1
OBS	9.99	25.97	62.96	34.79	53.18	45.25	36.83	18.81	16.16	1.60	0.60	0.36	306.5
BIAIS	-31%	-35%	-72%	-39%	-59%	-58%	-53%	-31%	-48%	67%	10%	306%	52%
040405	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Annuel
SIM	12.58	20.70	22.58	19.48	20.73	22.27	23.97	14.57	16.05	9.56	4.40	6.10	193
OBS	13.39	27.24	57.83	36.10	42.80	45.96	40.51	29.21	30.19	2.68	0.96	1.94	328.8
BIAIS	-6%	-24%	-61%	-46%	-52%	-52%	-41%	-50%	-47%	257%	358%	214%	-41%
040502	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Annuel
SIM	6.94	16.84	17.92	21.28	21.56	19.04	17.32	12.96	8.42	2.67	0.66	1.46	147.1
OBS	11.10	19.96	62.32	39.31	45.24	56.77	39.73	25.62	24.94	2.35	1.49	2.25	331.1
BIAIS	-37%	-16%	-71%	-46%	-52%	-66%	-56%	-49%	-66%	14%	-56%	-35%	56%
040504	Période 1981-2005												
	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Annuel
SIM	7.12	12.68	16.09	18.20	18.78	16.15	16.34	10.88	8.41	2.82	0.65	1.34	129.5
OBS	9.25	18.93	43.96	27.54	39.76	34.38	27.06	20.56	19.70	1.19	0.17	0.82	243.3
BIAIS	-23%	-33%	-63%	-34%	-53%	-53%	-40%	-47%	-57%	137%	282%	63%	-47%

Comparaison entre les biais brutes et les biais corrigés par les méthodes delta et quantile quantile

- modèles CNRM « RCP4.5 »

40203 CNRM	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	février	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-36%	5%	-29%	-14%	27%	19%	43%	-4%	13%	-15%	-30%	4%	-8%
DELTA	-60%	-28%	-30%	-16%	-16%	403%	362%	147%	-7%	20%	-55%	16%	-19%
QUANTILE	-51%	-58%	-20%	7%	-17%	569%	91%	144%	4%	-2%	-44%	-40%	-25%
00301CNRM	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-34%	5%	-21%	-16%	27%	31%	113%	2%	22%	-19%	-32%	7%	-9%
DELTA	-80%	-57%	-54%	6%	17%	1039%	1600%	1921%	59%	-19%	-76%	-50%	-38%
QUANTILE	-66%	-36%	-26%	55%	66%	1569%	2611%	3783%	149%	15%	-61%	-29%	-5%
40405 CNRM	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-37%	2%	-22%	-13%	7%	21%	2%	-3%	9%	5%	-29%	0%	-7%
DELTA	-52%	-15%	-25%	-5%	-32%	274%	374%	-80%	10%	12%	-51%	22%	-18%
QUANTILE	-30%	-49%	2%	43%	-44%	638%	1081%	159%	40%	15%	-37%	-32%	-9%
40502 CNRM	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-34%	5%	-21%	-16%	27%	31%	113%	2%	22%	-19%	-32%	5%	-9%
DELTA	-27%	31%	38%	87%	38%	408%	-178%	-500%	100%	169%	-18%	119%	39%
QUANTILE	20%	56%	99%	210%	138%	1486%	1392%	440%	226%	286%	22%	68%	108%
40504 CNRM	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	Fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-35%	11%	-22%	-19%	21%	32%	70%	-15%	15%	-14%	-32%	9%	-9%
DELTA	-60%	22%	13%	68%	57%	1353%	6019%	-11%	104%	51%	-44%	39%	21%
QUANTILE	-21%	67%	80%	154%	138%	2530%	15236%	1464%	279%	144%	-1%	93%	110%

- Modèle CNRM « RCP 8.5 »

40203	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-34%	-55%	-29%	-20%	-18%	10%	9%	32%	-6%	-47%	-26%	-57%	-29%
DELTA	-43%	-63%	-2%	39%	-20%	635%	582%	615%	42%	-17%	-43%	-56%	-15%
QUANTILE	-54%	-57%	7%	-10%	-29%	874%	655%	731%	61%	1%	-34%	-49%	-12%
400301	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-35%	-59%	-20%	-22%	-7%	-4%	23%	-9%	-10%	-56%	-16%	-54%	-32%
DELTA	-53%	-71%	-5%	47%	2%	372%	514%	735%	6%	-42%	-45%	-53%	-32%
QUANTILE	-60%	-39%	-61%	55%	66%	876%	2236%	3249%	243%	-20%	-65%	-36%	-15%
40405	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-34%	-55%	-29%	-27%	-24%	19%	9%	15%	3%	-31%	-24%	-53%	-24%
DELTA	-46%	-67%	-17%	15%	-24%	933%	1744%	550%	123%	-12%	-49%	-66%	-14%
QUANTILE	-51%	-55%	6%	-26%	18%	649%	2408%	845%	170%	-4%	-37%	-52%	-3%
40502	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-35%	-59%	-20%	-22%	-7%	-4%	23%	-9%	-10%	-56%	-16%	-54%	-32%
DELTA	-32%	-66%	3%	30%	-10%	484%	537%	278%	46%	10%	-28%	-42%	-14%
QUANTILE	-62%	-61%	-76%	-6%	-19%	382%	536%	231%	93%	-18%	-70%	-36%	-39%
40504	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-29%	-51%	-22%	-23%	-22%	0%	15%	2%	8%	-59%	-26%	-49%	-31%
DELTA	-40%	-56%	16%	25%	-26%	640%	3746%	458%	52%	-25%	-33%	-38%	-15%
QUANTILE	-67%	-36%	2%	29%	-21%	1313%	7530%	887%	117%	-12%	-59%	-1%	-7%

- **Modele MPI « RCP 4.5 »**

	PÉRIODE 2074-2099												
40203 MPI	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
BRUTE	-24%	-29%	-29%	-31%	-27%	-36%	65%	-24%	-35%	-37%	-44%	-3%	-27%
DELTA	-26%	-27%	-12%	-24%	-30%	186%	368%	318%	-13%	28%	-57%	20%	-14%
QUANTILE	-41%	-40%	-19%	4%	-44%	245%	434%	408%	17%	27%	-42%	6%	-15
	PÉRIODE 2074-2099												
40301 MPI	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
BRUTE	-31%	-26%	-23%	-47%	-8%	-45%	28%	-31%	-59%	-40%	-36%	-6%	-29%
DELTA	-42%	-23%	-21%	-32%	-1%	100%	196%	551%	-45%	-15%	-64%	26%	-26%
QUANTILE	-27%	-52%	-30%	36%	75%	685%	1381%	2630%	91%	8%	-43%	-27%	-9%
	PÉRIODE 2074-2099												
40405MPI	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
BRUTE	-22%	-25%	-29%	-24%	-36%	-40%	25%	6%	-24%	-21%	-47%	6%	-24%
DELTA	-24%	-26%	-15%	-25%	-35%	257%	887%	427%	37%	16%	-60%	15%	-13%
QUANTILE	-16%	-30%	-4%	-2%	-32%	435%	1299%	702%	74%	18%	-48%	-4%	-3%
	PÉRIODE 2074-2099												
40502MPI	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
BRUTE	-32%	-18%	-23%	-48%	-11%	-45%	41%	-29%	-58%	-38%	-37%	-7%	-28%
DELTA	-18%	-29%	-12%	-27%	-13%	234%	340%	211%	-3%	39%	-54%	31%	-11%
QUANTILE	-19%	-66%	-41%	-13%	-6%	300%	315%	203%	42%	27%	-46%	-40%	-26%
	PÉRIODE 2074-2099												
40504 MPI	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
BRUTE	-30%	-13%	-22%	-41%	-13%	-46%	51%	-21%	-50%	-19%	-42%	-9%	-25%
DELTA	-30%	-9%	10%	-35%	-16%	195%	1827%	261%	-19%	20%	-56%	40%	-11%
QUANTILE	-37%	-45%	-18%	6%	-5%	619%	4183%	778%	104%	11%	-32%	26%	-3%

- modèle MPI « RCP8.5 »

40203 MPI	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-22%	-24%	-61%	-20%	-74%	15%	78%	-29%	-62%	-54%	-48%	-56%	-42%
DELTA	-13%	-18%	-46%	-5%	-66%	422%	463%	461%	-31%	-5%	-52%	-37%	-22%
QUANTILE	-55%	-61%	-46%	-36%	-53%	646%	665%	480%	-9%	-2%	-59%	-45%	-34%
40301 MPI	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-29%	-27%	-60%	-38%	-73%	-24%	130%	-49%	-64%	-46%	-33%	-55%	-43%
DELTA	-37%	-29%	-61%	-11%	-74%	154%	419%	393%	-43%	-26%	-59%	-44%	-41%
QUANTILE	-80%	-60%	-70%	8%	39%	978%	3088%	2839%	43%	-15%	-78%	-57%	-36%
40405MPI	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-18%	-19%	-64%	-17%	-74%	-21%	34%	-34%	-42%	-36%	-47%	-49%	-38%
DELTA	-17%	-16%	-50%	-11%	-70%	441%	1198%	301%	22%	4%	-56%	-41%	-22%
QUANTILE	-21%	-48%	-47%	-36%	-60%	695%	1547%	513%	16%	-12%	-52%	-53%	-26%
40502MPI	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-29%	-27%	-60%	-38%	-73%	-24%	131%	-49%	-64%	-46%	-33%	-55%	-43%
DELTA	-8%	-31%	-46%	-4%	-54%	361%	554%	279%	16%	36%	-45%	-30%	-19%
QUANTILE	-76%	-62%	-75%	-39%	-9%	572%	468%	267%	12%	-3%	-78%	-55%	-47%
40504 MPI	PÉRIODE 2074-2099												annuel
	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
BRUTE	-28%	-21%	-59%	-30%	-76%	-13%	140%	-55%	-69%	-34%	-36%	-58%	-42%
DELTA	-23%	-11%	-36%	-10%	-68%	454%	3552%	310%	-19%	-1%	-42%	-27%	-21%
QUANTILE	-80%	-66%	-42%	-31%	-36%	1055%	5561%	729%	36%	-29%	-59%	8%	-31%

• Comparaison entre les biais saisonniers, des périodes humides brutes et corrigées futurs Scenario « RCP 4.5 »

40203 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	Automne	HUMIDE
BRUTE	-9%	-11%	21%	-15%	-17%
DELTA	-27%	-22	326%	-28%	-29%
QUANTILE	-51%	-11%	319%	-26%	-39%
400301 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-7%	-10%	42%	-19%	-16%
DELTA	-64%	-22%	1294%	-47%	-61%
QUANTILE	-46%	16%	2124%	-20%	-41%
40405 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-12%	-11%	9%	-7%	-14%
DELTA	-17%	-22%	168%	-25%	-23%
QUANTILE	-37%	0%	548%	-12%	-25%
40502 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-8%	-10%	42%	-19%	-16%
DELTA	37%	52%	-71%	36%	34%
QUANTILE	48%	141%	1076%	103%	68%
40504 CNRM	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-5%	-12%	32%	-18%	-15%
DELTA	-7%	43	1149%	1%	-7%
QUANTILE	39%	120%	2985%	74%	46%

40203 MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-19%	-29%	-13%	-39%	-28%
DELTA	-13%	-21%	273%	-28%	-19%
QUANTILE	-27%	-20%	342%	-15%	-24%
40301 MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-21%	-28%	-31%	-42%	-26%
DELTA	-18%	-19%	186%	-49%	-29%
QUANTILE	-36%	11%	1122%	-16%	-32%
40405MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-14%	-30%	-12%	-32%	-24%
DELTA	-13%	-24%	425%	-26%	-21%
QUANTILE	-17%	-12%	676%	-13%	-19%
40502MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-19%	-29%	-28%	-41%	-26%
DELTA	-9%	-16%	251%	-28%	-16%
QUANTILE	-44%	-24%	268%	-20%	-38%
40504 MPI	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-18%	-25%	-26%	-36%	-23%
DELTA	-5%	-11%	331%	-31%	-12%
QUANTILE	-23%	-7%	921%	-2%	-21%

Comparaison entre les biais saisonniers, des périodes humides brutes et corrigées futurs Scenario « RCP 8.5 »£

40203 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-49%	-23%	15%	-30%	-41%
DELTA	-54%	5%	614%	-23%	-40%
QUANTILE	-54%	-8%	773%	-11%	-34%
40301 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-49%	-18%	0%	-31%	-39%
DELTA	-60%	10%	456%	-39%	-47%
QUANTILE	-47%	-2%	1528%	-22%	-50%
40405 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-47%	-27%	15%	-19%	-37%
DELTA	-60%	-10%	940%	-15%	-45%
QUANTILE	-53%	0%	1020%	0%	-34%
40502 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-50%	-18%	1%	-31%	-39%
DELTA	-49%	7%	421%	-11%	-32%
QUANTILE	-55%	-41%	364%	-40%	-59%
40504 CNRM	2074-2099				
	Hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-43%	-22%	4%	-34%	-38%
DELTA	-45%	6%	781%	-20%	-31%
QUANTILE	-39%	3%	1572%	-24%	-36%

40203 MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-33%	-53%	12%	-53%	-44%
DELTA	-21%	-40%	444%	-36%	-30%
QUANTILE	-55%	-45%	610%	-37%	-49%
40301 MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-37%	-56%	-10%	-43%	-41%
DELTA	-36%	-51%	249%	-49%	-44%
QUANTILE	-67%	-25%	1434%	-49%	-65%
40405MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-28%	-54%	-13%	-42%	-39%
DELTA	-23%	-45%	522%	-29%	-32%
QUANTILE	-40%	-48%	778%	-32%	-41%
40502MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-37%	-56%	-10%	-43%	-41%
DELTA	-23%	-36%	378%	-20%	-27%
QUANTILE	-64%	-46%	434%	-51%	-64%
40504 MPI	2074-2099				
	hiver	printemps	été	automne	HUMIDE
BRUTE	-36%	-54%	-4%	-42%	-40%
DELTA	-20%	-38%	609%	-28%	-25%
QUANTILE	-53%	-37%	1236%	-39%	-50%