

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش الجزائر

École Nationale Supérieure Agronomique d'El Harrach

Thèse

Présentée par :

KOURAT TASSADIT

En vue d'obtention de diplôme de

Doctorat en Sciences Agronomiques

Option : Hydraulique Agricole

Thème

**Évaluation du changement climatique et impact sur la production du blé dur
pluvial dans les Hautes plaines orientales de l'Algérie.**

Soutenue publiquement, le 14 Juillet 2021, devant le jury composé de :

Président : SEMAR Achène (Professeur, ENSA El Harrach)

Directeur de thèse : SMADHI Dalila (Maitre de recherche A, INRAA, Alger)

Co-directeur de thèse : MOUHOUCHE Brahim (Professeur, ENSA El Harrach)

Examineur: ZELLA Lakhdar (Professeur, Université Saad Dahleb –Blida)

Examineur : LARIBI Abdelkader (Maître de conférence A, ENSA El Harrach)

Examineur : MADANI Azzeddine (Maître de Conférences A, Université de Khemis Miliana)

Année universitaire 2020/2021

“Nous sommes habitués à avoir une nourriture abondante à un prix abordable. Cela peut se poursuivre avec l’adoption d’une bonne recherche et de l’innovation dans l’agriculture.”

Professeur Tim Benton, chargé de cours à l’Université de Leeds et membre du programme de sécurité alimentaire mondiale (PAM) du Royaume-Uni.

“Nous sommes la première génération à ressentir les effets du changement climatique et la dernière à pouvoir y remédier.”

Barack Obama, ancien président des USA.

“Les données suggèrent un lien certain entre l’insécurité alimentaire et les conflits. Le climat est un facteur de stress supplémentaire.”

Ertharin Cousin, Directeur exécutif du PAM

“Notre civilisation du début du 21^e siècle est en difficulté. Nous n’avons pas besoin d’aller au-delà de l’économie alimentaire mondiale pour le constater. Au cours des dernières décennies, nous avons créé une bulle de production alimentaire, basée sur des tendances environnementales qui ne peuvent pas être soutenues, notamment le pompage excessif des aquifères, le labourage excessif des terres et la surcharge de l’atmosphère en dioxyde de carbone”.

Extrait de livre «World on the Edge: How to Prevent Environmental and Economic Collapse». Écrit par Lester R. Brown.

“La science doit appartenir aux scientifiques et non aux éditeurs”

Alexandra Elbakyan, Fondatrice du site Sci-Hub d’accès libre aux publications scientifiques.

Dédicaces

A la mémoire de mon défunt père qui nous a quitté au début de mon parcours doctoral, malgré son absence physique, il n'a jamais quitté mes pensées, je le remercie pour tous les sacrifices qu'il a fait pour moi pour que je sois ce que je suis aujourd'hui.

A ma source inépuisable de tendresse, de sagesse et de patience, ma chère mère, que dieu te garde pour nous tous.

A ma chère grand-mère à qui je souhaite une bonne santé et une longue vie.

A mes cher(e)s sœurs et frères.

A mes cher(es) nièces et neveux.

A toutes les personnes qui ont contribué à l'achèvement de ce modeste travail de recherche de près ou de loin, que ce soit en me fournissant un outil de travail,

en m'orientant, me conseillant ou tout simplement

en me soutenant moralement.

Tassadit Kourat.

Remerciements

*Je remercie d'abord, **Dieu tout puissant**, de m'avoir donné la santé, la patience, la persévérance et le courage pour surmonter toutes les difficultés rencontrées lors de mon chemin de recherche et de m'aider à mener à terme ce modeste travail.*

*Ma très grande gratitude s'adresse à ma Directrice de thèse, Madame **SMADHI D**, Maître de recherche A, à l'INRAA, station Mehdi Boualem de Baraki, je la remercie infiniment d'avoir fait confiance en moi pour achever ce travail de recherche dans les délais souhaités, je suis très reconnaissante pour elle, pour tous les outils de travail qu'elle m'a fourni, ses orientations, ses conseils, ses encouragements et surtout pour son côté humain et son écoute durant mes cinq années de travail de thèse.*

*Ma profonde gratitude s'adresse aussi à mon Co-directeur de thèse, Monsieur. **MOUHOUCHE B**. Professeur à l'ENSA El Harrach, d'abord de m'avoir recommandé à Madame SMADHI et pour sa contribution dans le bon déroulement de mon parcours doctoral à l'ENSA El Harrach.*

*C'est avec grande reconnaissance, que je remercie Monsieur, **SEMAR A**, Professeur à l'ENSA El Harrach, d'avoir accepté de présider le jury et de m'avoir orienté vers ce créneau de recherche, si passionnant, et ce depuis ma thèse de Magister, en sciences de la terre à l'USTHB. Vous restez un exemple de la générosité d'un chercheur qui trouve tant de joie et de passion dans le partage de son savoir.*

*Mes vifs remerciements s'adressent aussi aux Messieurs : **ZELLA L**, Professeur à l'Université de Saad Dahleb de Blida, Monsieur **LARIBI A**, Maître de conférence A, à l'ENSA d'El Harrach et Monsieur **MADANI A**, Maître de Conférences (A) à l'Université de Khemis Miliana, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je n'oublie pas de remercier Monsieur **Brachemi O** et mademoiselle **Ghouari N**, de l'Office National de la Météorologie, pour leur importante aide dans l'élaboration de la base de données Euro-cordex.*

*Je remercie également Monsieur, **M. G. Mostofa A**, Professeur au Department of Irrigation and Water Management, à Bangladesh Agricultural University, pour sa contribution scientifique très enrichissante.*

Je remercie ma chère famille pour leur soutien et leurs encouragements, pour mener à terme ma thèse. Comme je témoigne ma gratitude à toute personne que je n'ai pas citée ici et qui a contribué d'une manière ou d'une autre dans la réalisation de ce modeste travail.

Résumé

Le maintien d'une production durable de blé dur (BD) en pluvial, dans un climat changeant est un défi majeure pour la sécurité alimentaire en Algérie. Cependant, les études évaluant l'impact de changement climatique (CC) futur sur la production de cette culture stratégique en Algérie, sont très rares. Ainsi, cette étude a l'objectif de combler le manque en ce type d'études, et plus précisément dans la région des hautes plaines orientales semi-arides de Sétif et Bordj Bou Arreridj (BBA), connues comme une zone potentielle de la céréaliculture pluviale. Pour arriver à cet objectif, des projections climatiques de la base de données EURO-CORDEX, pour les deux horizons futurs : proche (2035-2064) et lointain (2065-2094), sous deux scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) RCP 4.5 et RCP 8.5, ont été réduites avec le modèle climatique ICHEC_KNMI et injectées par la suite dans le modèle de culture AquaCrop, pour simuler les rendements d'un cultivar de BD appelé «Mexicali», durant ces deux périodes futures, sous ces deux scénarios RCP. Ces données climatiques futures simulées sont préalablement corrigées de leurs biais avec la méthode des deltas. La précision de modèle AquaCrop dans la simulation des rendements de ce cultivar de BD, observés durant trois années successives, dans un site expérimental à Sétif, est évaluée avec les trois indices statistiques RMSE, NRMSE et l'indice (d) de Willmott, dans l'ensemble les valeurs de ces derniers se situent dans la fourchette acceptable pour prédire le rendement (RMSE = 0,41 t/ha, NRMSE = 8,81% et d = 0,80). En comparaison aux rendements moyens de BD, simulés par AquaCrop pour la période référence (PR) (1981-2010), estimés à 34.7 et 23.3 qx/ha à Sétif et BBA respectivement, des gains de rendements, correspondant à (+ 82 et + 16), (+ 94.7 et + 7.8), (+ 76.7 et + 133) et (+188 et + 135) % sont projetés sous les scénarios futurs RCP 4.5 (2035-2064), RCP 4.5 (2065-2094), RCP 8.5 (2035-2064) et RCP 8.5 (2065-2094), sur les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA respectivement. L'amélioration des rendements futurs de BD pourrait être induite par l'effet fertilisant de la hausse des concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) [CO₂] dans l'atmosphère. Cet effet compense les effets négatifs sur les rendements de BD, de la hausse des températures, de la diminution des précipitations et du rayonnement solaire net incident, projetés durant le cycle de croissance de blé, sous ces scénarios futurs. Cependant, cet effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ sur le rendement de blé pourrait être inhibé par une baisse des températures et par l'effet combiné d'un stress hydrique et thermique très sévères, prévus au cours de la période déroulement de cycle de BD, dans les scénarios de CC futur étudiés, dans les deux sites. Sous les deux scénarios RCP, le modèle AquaCrop a prédit aussi, une augmentation de la productivité de l'eau de BD, induite par la diminution attendue des pertes de l'eau par évapotranspiration, due à la stimulation de la photosynthèse, ce qui implique, que ces deux mécanismes physiologiques sont stimulés par l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂. La hausse projetée des températures, durant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé, devrait raccourcir sa durée. Sous les conditions climatiques futures des deux scénarios RCP, des semis précoces à la mi-octobre, s'avèrent plus adaptés que des semis tardifs au mois de Novembre et Décembre, car ils permettent à la culture de blé de bénéficier de l'augmentation des précipitations pendant sa phase de développement végétatif et d'éviter les températures très élevées de fin de printemps qui coïncident avec le stade de remplissage des grains. Des variétés à cycle court peuvent être aussi efficaces pour s'adapter à la hausse des températures prévue sous les deux scénarios RCP.

Mots clés : changement climatique, blé dur, Hautes plaines orientales, modèle climatique ICHEC_KNMI, scénarios RCP et modèle de culture AquaCrop.

Abstract

Maintaining sustainable rainfed wheat production in a changing climate is a major challenge for food security in Algeria. Studies assessing the impact of future climate change (CC) on this strategic crop production in Algeria are very rare. Thus, this study aims to fill the gap in this kind of studies, mainly in the region of the semi-arid High eastern plains of Sétif and Bordj Bou Arreridj (BBA), known as a potential area of rainfed cereals production. To achieve this objective, climate projections derived from the EURO-CORDEX database, for the two future horizons: near (2035-2064) and far (2065-2094), under two RCP (Representative Concentration Pathway) scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, were downscaled with the ICHEC_KNMI climate model and subsequently introduced into the AquaCrop crop model, to simulate durum wheat yield of one cultivar called "Mexicali" by these both future horizons, under these both RCP scenarios. These simulated future climate data are first corrected from their bias using the delta method. The precision of the AquaCrop model in the simulation of wheat yield during three growing seasons in an experimental site at Sétif, is evaluated with the three statistical indices RMSE, NRMSE and the index (d) of Willmott, overall the values of the latter are within the acceptable range for predicting yield (RMSE = 0, 41 t / ha, NRMSE = 8.81% and d = 0.80). In comparison to the average durum wheat yields, simulated by AquaCrop for the reference period (1981-2010), estimated at 34.7 and 23.3 qx / ha at Sétif and BBA respectively, yield gains, corresponding to (+ 82 and + 16) , (+ 94.7 and + 7.8), (+ 76.7 and + 133) and (+188 and + 135)% are projected under the future scenarios RCP 4.5 (2035-2064), RCP 4.5 (2065-2094), RCP 8.5 (2035-2064) and RCP 8.5 (2065-2094), on the both experimental sites of Sétif and BBA respectively. The improvement in future yields is due to the fertilizing effect of increasing carbon dioxide (CO₂) concentrations in the atmosphere, which offsets the negative effects on wheat yields of rising temperatures, decline of precipitation and incident net solar radiation projected during the wheat growing cycle, under these future scenarios. However, this fertilizing effect of CO₂ enrichment on wheat yield is inhibited by lower temperatures and the combined effect of very severe water and heat stress. Under both RCP scenarios, the AquaCrop model predicted an increase in the wheat water productivity induced by the expected decrease in water losses by evapotranspiration and the stimulation of photosynthesis, indicating that these two physiological mechanisms are stimulated by the enrichment of the atmosphere in CO₂. The projected rise in temperature during the wheat growing season is expected to shorten its duration. Under the future climatic conditions of both RCP scenarios, early sowing in October turns out to be more suitable than late sowing in November and December, as they allow the wheat crop to benefit from the increase in precipitation during its vegetative development stage and avoid the very high temperatures of late spring that coincide with the grain filling stage. Short-cycle varieties may be equally effective in adapting to the temperature rise expected under both RCP scenarios.

Keywords: climate change, wheat, Eastern high plains, ICHEC_KNMI climate model, RCP scenarios and AquaCrop crop model.

ملخص

يعتبر الحفاظ على إنتاج القمح البعلي المستدام في ظل مناخ متغير تحديا كبيرا للأمن الغذائي في الجزائر. بالرغم من ذلك، فإن الدراسات التي تقيم تأثير تغير المناخ في المستقبل على إنتاج القمح البعلي في الجزائر نادرة جدًا. وبالتالي، تهدف هذه الدراسة إلى سد الفجوة في هذا النوع من الدراسات، خاصة في منطقة الهضاب العليا الشرقية شبه الجافة في سطيف و برج بوعريريج (BBA) ، والمعروفة بمنطقة محتملة لهذا المحصول الاستراتيجي. لتحقيق هذا الهدف، التوقعات المناخية المستمدة من قاعدة بيانات EURO-CORDEX، للأفقين المستقبليين: القريب (2035-2064) والبعيد (2065-2094) ، في إطار سيناريوهين RCP مسار التركيز التمثيلي (RCP 4.5 و RCP 8.5) ، تم تقليص سلمها باستخدام نموذج المناخ ICHEC KNMI وإدخالها لاحقًا في نموذج محصول AquaCrop ، لمحاكاة محصول القمح الصلب لصنف واحد يسمى "Mexicali" لهذين الأفقين المستقبليين، في ظل كلا سيناريوهين. RCP. يتم أولاً تصحيح هذه البيانات المناخية المحاكاة في المستقبل من أجل تحيزه باستخدام طريقة Delta. تم تقييم دقة نموذج AquaCrop في محاكاة محصول القمح الصلب والكتلة الحيوية فوق الأرض التي لوحظت خلال ثلاثة مواسم نمو في موقع تجريبي في سطيف، باستخدام المؤشرات الإحصائية الثلاثة RMSE و NRMSE و مؤشر (d) ل-Willmott ، بصفة عامة قيم هذه الأخيرة ضمن النطاق المقبول للتنبؤ بكل من المحصول ، $RMSE = 0.41$ قنطار/ هكتار ، % $NRMSE = 8.81$ و $d = 0.80$ بالمقارنة مع متوسط إنتاجية القمح الصلب ، الذي تمت محاكاته بواسطة AquaCrop الفترة المرجعية (1981-2010) ، المقدرة بـ 37.4 و 23.3 قنطار/ هكتار في سطيف و BBA على التوالي، مكاسب الغلة المقابلة لـ (82 + و 16 +) ، (94.7 + و 7.8 +) ، (76.7 + و 133 +) و (188 + و 135 +)٪ متوقعة في إطار سيناريوهات المستقبلية RCP 4.5 (2064-2035) ، RCP 8.5 (2094- 2065) ، RCP 8.5 (2064-2035) -2094 (2065) ، في كلا الموقعين التجريبيين في سطيف و BBA على التوالي يعود التحسن في الغلات المستقبلية إلى تأثيراً لتسميد لزيادة تركيز نثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، والتي تعوض الآثار السلبية على محاصيل القمح الناجمة عن ارتفاع درجات الحرارة، وانخفاض هطول الأمطار وصافي الإشعاع الشمسي المتوقع أثناء دورة نمو القمح. في ظل هذه السيناريوهات المستقبلية ومعدلك، فإن هذا التأثير الإيجابي لأكسيد الكربون على محصول القمح يتم تثبيته بتأثير درجات الحرارة المنخفضة والتأثير المشترك للضغط الشديد لشح للماء وارتفاع درجات الحرارة. في ظل كل سيناريوهين RCP ، توقع نموذج AquaCrop زيادة في إنتاجية مياه القمح الناجمة عن الانخفاض المتوقع في فقد المياه عن طريق التبخر وتحفيز التركيب الضوئي، مما يشير إلى أن هاتين الآليتين الفسيولوجيتين يتم تحفيزهم عن طريق إثراء الغلاف الجوي بثاني أكسيد الكربون. من المتوقع أن يؤدي الارتفاع المتوقع في درجة الحرارة خلال موسم زراعة القمح إلى تقصير مدة دورة النمو. في ظل الظروف المناخية المستقبلية لكلا سيناريوهين RCP ، تبين أن البذور المبكر في أكتوبر يكون أكثر ملائمة من البذور المتأخر في نوفمبر وديسمبر، حيث أنه يسمح لمحصول القمح بالاستفادة من الزيادة في هطول الأمطار خلال مرحلة النمو الخضري وتجنب ارتفاع درجات الحرارة في أواخر الربيع الذي يتزامن مع مرحلة امتلاء الحبوب. قد تكون الأصناف قصيرة دورة النمو فعالة أيضاً في التكيف مع ارتفاع درجة الحرارة المتوقعة في ظل كلا سيناريوهين RCP.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، القمح الصلب، الهضاب العليا الشرقية ، نموذج ICHEC_KNMI ، سيناريوهات RCP ، نموذج AquaCrop

Sommaire

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Sommaire	VII
Liste des tableaux	XV
Liste des figures	XVI
Liste des abréviations	XX
Introduction générale	1
Partie I: Synthèse bibliographique	4
Chapitre 1 : Changement climatique actuel observé et futur projeté dans le monde et en Algérie	4
1. Introduction	4
2. Quelques définitions	4
2.1 Définition de changement et de variabilité climatique	4
2.2. Définition de réchauffement planétaire	4
3. Les origines de changement climatique	5
3.1 Origines naturelles	5
3.1.1.Éruptions volcaniques	5
3.1.2 Courants océaniques	5
3.1.3 Changements orbitaux de la Terre	6
3.1.4 Variations de l'activité solaire	6
3.1.5 Variabilité interne	7
3.2 Origine anthropique de changement climatique global	8
3.2.1 Effet de serre et bilan énergétique global	8
3. 2.2 Évolution des concentrations de GES dans l'atmosphère	9

3.3 Chronologie d'une prise de conscience mondiale du changement climatique anthropique	11
4. Changements climatiques observés à l'échelle globale	13
4.1. A l'échelle globale	13
4.1.1 Changement observé sur les températures	13
4.1.2 Changements observés sur les précipitations	15
4.1.3 Événements météorologiques extrêmes	16
4.1.3.1 Vagues de chaleurs extrêmes.....	16
4.1.3.2 Pluies intense et mousson.....	17
4.1.3.3 Inondations	17
4.1.3.4 Sécheresses	18
4.1.3.5 Intensification des ouragans, des cyclons et tornades.....	19
4.2 Changement climatique observé en Algérie	19
4.2.1 Précipitations	19
4.2.2 Températures	20
4.2.3. Événements météorologiques extrêmes	21
4.2.3.1 Sécheresses	21
4.2.3.2 Les vagues de chaleur	22
4.2.3.3 Inondations	22
5. Modélisation de climat future	23
5.1 Les Modèles de Circulation Générale (MCG)	23
5.2 Les modèles de circulation régionale (MCR)	24
5. 3 Descente d'échelle (ou Downscaling)	24
5.3.1 Types de méthodes de descente d'échelle.....	26
5.3.1.1 Méthodes de descente d'échelle statistique.....	26
5.3.1.2 Méthodes de descente d'échelle dynamique	26
5.4 Les scénarios futurs d'émission des GES	27
5.4.1 Les scénarios SA90 et IS92 (période 1990- 2000).....	27
5.4.2 Les scénarios SRES (Période 2000-2012)	28

5.4.3 Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway).....	30
6. Les projections climatiques futures selon les scénarios RCP	33
6.1 A l'échelle de globe	33
6.1.1 Température.....	33
6.1.2 Les précipitations.....	35
6.2 A l'échelle de l'Algérie.....	35
6.2.1 Températures	35
6.2.2 Vagues de chaleur.....	36
6.2.3 Pluies extrêmes avec risque d'inondations	36
6.2.4 Jours secs consécutifs «sécheresse»	36
7. Les incertitudes dans les projections climatiques.....	37
7.1. Méthodes de correction des données climatiques simulées	38
Conclusion	39
Chapitre II : Modélisation de l'impact du changement climatique sur les cultures	40
1. Introduction.....	40
2. Impact de changement climatique sur la productivité des cultures.....	40
2.1 Impact de changement des températures sur les cultures	41
2.2. Impact de changement de régime des pluies sur les cultures.....	42
2.3 Impact de changement de rayonnement solaire sur les cultures	44
2.4 Impact de changement de concentration en CO ₂ dans l'atmosphère sur les cultures	45
2.5 Impact de la fréquence des événements climatiques extrêmes sur les cultures	48
2.6 Combinaison des impacts des changements des températures, précipitations et des concentrations en CO ₂	50
3. Modélisation des cultures.....	51
3.1 Définition d'un modèle de culture.....	51
3.2 Historique de développement des modèles de cultures	52
3.3 Type de modèles de culture.....	54
3.3.1 Modèles statistiques ou mécanistes	54
3.3.1.1 Modèles statistiques	54

3.3.1.2 Modèles mécanistes (empiriques).....	55
3.3.2 Modèles statiques et dynamiques	55
3.3.2.1 Les modèles statiques.....	55
3.3.2.2 Modèles dynamiques.....	56
3.3.3 Modèles déterministes et stochastiques	57
3.3.3.1 Modèles déterministes.....	57
3.3.3.2 Les modèles stochastiques.....	57
3.3.4 Modèles spécifiques et modèles génériques.....	57
3.3.4.1 Les modèles spécifiques.....	57
3.3.4.2 Les modèles génériques	58
3.4 Application de la modélisation des cultures.....	58
3.4.1 Prévission de rendement.....	58
3.4.2 Optimisation de la gestion des cultures	59
3.4.3 Dates de semis optimales pour la production de semences hybrides	59
3.4.4 Sélection génétique des variétés à cultiver.....	60
3.4.5 Lutte contre les ravageurs et les maladies.....	61
3.4.6 Évaluation de l'impact du changement climatique sur les cultures et anticipation des stratégies d'adaptation	61
Conclusion	63
Chapitre III : La production de blé dans le monde et en Algérie	64
1. Introduction.....	64
2. Origine de blé.....	64
3. Les pays producteurs de blé dans le monde	64
4. Cycle de croissance de blé	65
4.1 La période végétative.....	66
4.1.1 Stade de germination.....	66
4.1.2. Stade levée-tallage	66
4.2 La période reproductrice	68
4.2.1 Stade montaison-gonflement.....	68

4.2.2 Le stade épiaison et floraison	68
4.3 La période de remplissage et maturation des grains	69
5. Exigences du blé	70
5.1. Exigences édaphiques	70
5.2. Exigences climatiques.....	70
5.2.1. Température.....	70
5.2.2. L'eau	71
5.2.3. La lumière	71
6. Zone de production de blé en Algérie.....	71
6.1 La distribution des superficies et des productions des blés (dur et tendre) par wilaya durant la période 1998/2019.....	73
7. Évolution des superficies et de la production de blé dur et tendre en Algérie	75
8. Évolution du rendement moyen national de blés (dur et tendre) durant la période 1998-2019..	77
9. Évolution de l'importation de blé en Algérie durant la période 2000-2019	78
Conclusion	80
Partie II : Matériel et méthodes	80
Chapitre IV: Matériel et Méthodes.....	81
1. Introduction	81
2. Description de la zone d'étude	81
2.1 Situation géographique et milieux naturel	81
2.2 Le climat de la région des Hautes plaines orientales.....	83
3. Sources des données climatiques	83
3.1 Données climatiques observées	83
3.2 Les données climatiques futures.....	83
3.2.1 Correction des biais des projections climatiques futures	84
4. Le modèle Aquacrop.....	85
4.1 Description de modèle Aquacrop	85
4.2 Données d'entrée de modèle Aquacrop	87
4.2.1 Données climatiques	87

4.2.1.1 Données climatiques observées	87
4.2.1.2 Données climatiques futures.....	88
4.2.1.3 Données de l'ET ₀ calculator	88
4.2.1.4 Données sol	89
4.3 Calibration de modèle AquaCrop.....	90
4. 4 Validation et évaluation de modèle AquaCrop	90
4.5 Évaluation de la fiabilité des sorties de modèle AquaCrop	91
5. Test de Pearson.....	93
6. Conclusion	94
Partie III : Résultats et discussions	94
Chapitre V : Étude du climat récent observé et changement climatique futur projeté à Sétif et Bordj Bou Arreridj.....	95
1. Introduction	95
2. Évaluation de la qualité des données climatiques simulées pour la période de référence	95
3. Changement de climat futur en comparaison au climat actuel (1981-2010)	97
3.1. A l'échelle annuelle	97
3.1.1 Précipitations	97
3.1.2 Températures	98
3.1.2.1 Températures maximales.....	98
3.1.2.2 Températures minimales	99
3.1.2.3 Températures moyennes.....	100
3.1.3 Rayonnement solaire net incident.....	101
3.1.4 Vitesse de vent.....	102
3.1.5 Humidité relative	103
3.1.6 Concentrations en CO ₂ dans l'atmosphère.....	104
3.2 Échelle mensuelle	105
3.2.1 Précipitations	105
3.2.2 Températures	107
3.2.2.1 Températures maximales.....	107

3.2.2.2 Températures minimales	108
3.2.2.3 Températures moyennes.....	110
3.2.3 Rayonnement solaire net incident.....	111
3.2.4 Vitesse de vent.....	113
3.2.5 Humidité relative	114
3.3 Échelle saisonnière	115
3.3.1 Précipitations	115
3.3.2 Températures	117
3.3.2.1 Températures maximales.....	117
3.3.2.2 Températures minimales	118
3.3.2.3 Températures moyennes.....	120
3.3.3 Vitesse de vent.....	122
3.3.4 Humidité relative	123
3.3.5 Rayonnement solaire net incident.....	125
Conclusion	126
1. Introduction.....	128
2. Résultat de la modélisation de l'impact de CC futur sur la culture de blé dur	128
2.1. Evaluation de la performance du modèle AquaCrop dans la simulation des rendements de blé observés	128
2.2. Climat futur projeté pendant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé dur	130
2.3. Impact du changement climatique sur la date de semis	131
2.4. Impact de changement climatique futur sur l'échec et/ ou la réussite de semis de blé dur ..	133
2.4.1 Cas d'un semis à une date fixée	133
2.4.2. Cas d'un semis dynamique.....	134
2.5. Evaluation de l'impact de changement climatique futur sur la culture de blé dur pluvial	135
2.5.1 Projections des rendements de blé dur dans les scénarios futurs de changement climatique	135
2.5.2 Projections de l'évapotranspiration de référence dans les scénarios futurs de changement climatique.....	136

2.5.3 Projections de la productivité de l'eau de blé dur dans les scénarios futurs de changement climatique.....	136
2.5.4 Projections futures des rendements de blé dur	137
2.5.5 Impact de changement climatique projeté sur la durée de la durée de cycle de croissance du blé dur	137
2.6 Adaptation de la culture de blé dur au changement climatique futur par le choix d'une date de semis	138
3. Discussion des résultats des simulations des rendements futur de blé dur	140
3.1 Projections futures des rendements de blé dur	140
3.2 Mécanisme de l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en CO ₂	142
3.3 Sensibilité des rendements de blé dur au changement climatique futur	143
3.4 Impact de changement climatique futur sur la durée de cycle de croissance de blé	144
3.5 Impact de changement climatique futur sur l'évapotranspiration de référence et de la productivité de l'eau de blé.....	144
3.6 Adaptation de blé pluvial au changement climatique futur par le choix d'une date de semis	146
Conclusion	146
Conclusion générale	148
Références bibliographiques	148

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques principales des scénarios RCP et similitudes avec les scénarios SRES	32
Tableau 2. Coordonnées géographiques et altitude des deux stations météorologiques de Sétif et BBA.	83
Tableau 3. Caractéristiques physiques des sols des deux sites expérimentaux de Sétif et de BBA estimées au laboratoire et simulées par le modèle SPAW.....	89
Tableau 4. Valeur des paramètres non conservatifs (calibrés et observés) et des paramètres conservatifs sur AquaCrop.....	92
Tableau 5. Comparaison des rendements et de la biomasse aérienne de cultivar de BD "Mexicali" observés et simulés pour les trois campagnes agricoles : 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013.	129
Tableau 6. Comparaison des moyennes interannuelles de T_{CC} , P_{CC} , Rn_{CC} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3, S4.....	131
Tableau 7. Comparaison des dates moyennes de semis dynamique simulées par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	132
Tableau 8. Taux d'échec de semis simulé par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 avec un semis au 15 novembre.	133
Tableau 9. Taux d'échec de semis simulé par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 avec une date semis dynamique générée par AquaCrop.....	134
Tableau 10. Comparaison des moyennes de 30 ans des rendements, de l' ET_0 , WP, date de maturité de grain et de la D_{CC} entre la PR et les scénarios S1, S2, S3 et S4.....	136
Tableau 11. Résultats de test de corrélation de Pearson, appliqué entre les séries de 30 ans, des rendements de cultivar du BD «Mexicali», simulés par AquaCrop et les séries de 30 ans des T_{CC} , P_{CC} et de Rn_{CC} observées durant la PR et projetées sous les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4.	137
Tableau 12. Résultats de test de corrélation de Pearson appliqué entre les séries chronologiques de D_{CC} de cultivar de BD "Mexicali" (simulées par AquaCrop) et les séries de 30 ans de T_{CC} et P_{CC} observées durant la PR et celles projetées dans les quatre scénarios futurs.....	138

Liste des figures

Figure 1. Effet de serre (Source : www.aquaportail.com)	9
Figure 2. Emission mondiale des GES durant la période 1850-2000 (Source GIEC. 2014).....	10
Figure 3. Total des émissions anthropiques de GES entre 1970 et 2010 (Source : GIEC. 2014)...	11
Figure 4. Température et concentration de CO ₂ dans l’atmosphère au cours des 400 000 dernières années avant l’ère industrielle (Source : World Data Center for Paleoclimatology, Boulder & NOAA Paleoclimatology Program)	13
Figure 5. Anomalies des températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans, observées entre 1850 et 2012 (source : GIEC, 2013).....	14
Figure 6. Anomalies décennales de la température de surface de la terre et de l’océan par rapport à la période de référence 1951-1980 (source : Hansen et al., 2010).....	15
Figure 7. Passage des données climatiques simulées d’échelle globale des GCM (à gauche) vers des données à résolution plus fine des MRC (à droite) par la méthode de réduction d’échelle dynamique (source : O’Sullivan et al. 2016)	25
Figure 8. Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite) (Source Charron, 2016)	25
Figure 9. Les émissions de CO ₂ dans les groupes de scénarios SRES (Source: GIEC. 2000)	29
Figure 10. Températures globale de la surface de la terre selon les scénarios SRES durant la période 1990- 2100 (source: GIEC, 2000).....	30
Figure 11. Approches de l’élaboration des scénarios de CC: a) approche séquentielle; (b) parallèle. Les nombres indiquent les étapes analytiques (2 a et 2 b se déroulent simultanément). Les flèches continues indiquent les transferts d’informations, les fleches en pointillés indiquent la sélection des RCP et intégration des informations et des rétroactions (Source : Moss et al., 2008)	31
Figure 12. Principales caractéristiques des scénarios RCP (Source : www.coastadapt.com.au)...	32
Figure 13. Les quatre scénarios RCP, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les SRES (Source : GIEC.(2011).....	33
Figure 14. Evolution de la température moyenne à la surface de globe en 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (source : GIEC. 2014).....	34
Figure 15. Changements prévus dans les températures moyennes en 2081-2100 à la surface de globe par rapport à la période 1986-2005 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 (source : GIEC. 2014)	34
Figure 16. Changements prévus dans les précipitations (%) en 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (source : GIEC. 2014)	35
Figure 17. Evolution durant la période 1900-2100, sous les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 : des températures moyennes annuelles (a), de nombre de jours de vagues de chaleurs (b)	

de nombre de jours avec les pluies extrêmes qui présentent le risque d'inondations (c) et les projections de nombre de jours secs consécutifs (sécheresse) (d) (source : OMS.2015).....	37
Figure 18. Projection de la rareté de l'eau jusqu'en 2025 dans différentes régions du monde (source : El-Beltagy et Madkour, 2012).....	44
Figure 19. Variation en pourcentage de la productivité agricole induite par le changement climatique sans l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'air en CO ₂ en 2080 par rapport à l'année 2003 (Cline, 2008).....	47
Figure 20. Variation en pourcentage de la productivité agricole induite par le changement climatique avec effet fertilisant de l'enrichissement de l'air en CO ₂ en 2080 par rapport à l'année 2003 (Cline, 2008).....	47
Figure 21. Répartition de la production mondiale du blé entre les 20 premiers pays producteurs de blé (source : FAOSTAT. 2021).....	65
Figure 22. Cycle de croissance du blé (source : Boufnar et Zaghouane, 2006).....	67
Figure 23. Détail de composition de l'épi et de la fleur de blé (source : Mosiniak et al., 2006)	70
Figure 24. Les zones potentielles de production de culture pluviale blé dans le Nord de l'Algérie (Source : Cadi et al., 2000).	72
Figure 25. Variabilité des superficies récoltées, des productions et des rendements de blé dur et tendre entre les 48 wilayas.....	74
Figure 26. Evolution des superficies récoltées et des productions du blé dur et blé tendre durant la période 1998/2019 en Algérie.....	76
Figure 27. Evolution des superficies récoltées et des productions totales (somme blé dur et blé tendre) durant la période 1998/2019 en Algérie	77
Figure 28. Evolution des rendements moyens des blés (durs et tendres) durant la période 1998-2019 a l'échelle nationale.....	78
Figure 29. Evolution des quantités du blé dur et tendre importées de l'Algérie et leurs factures d'importation durant la période 1998/2019	79
Figure 30. Variabilité des quantités et factures moyennes des blés importés durant la période 2017-2019	80
Figure 31. Situation géographique de la zone d'étude (source. Kourat. 2015).....	82
Figure 32. Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante (Steduto et al. 2008).....	86
Figure 33. Comparaison de degré de rapprochement entre les moyennes mensuelles observées et simulées des T _{min} , T _{max} , P, et de R _n des deux stations de Sétif et de BBA pour la PR.....	96
Figure 34. Comparaison des moyennes de 30 ans des Pa entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4.....	98

Figure 35. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_a} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	99
Figure 36. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{min_a} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	100
Figure 37. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{moy_a} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	101
Figure 38. Comparaison des moyennes de 30 ans des R_{na} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	102
Figure 39. Comparaison des moyennes de 30 ans des V_a entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	103
Figure 40. Comparaison des moyennes de 30 ans des H_{ra} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	104
Figure 41. Comparaison des moyennes de 30 ans des $[CO_2]$ entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	105
Figure 42. Comparaison des moyennes de 30 ans des P_m entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA.	106
Figure 43. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	108
Figure 44. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{min_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4	110
Figure 45. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{moy_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	111
Figure 46. Comparaison des moyennes de 30 ans des R_{n_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	112
Figure 47. Comparaison des moyennes de 30 ans des V_m entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	114
Figure 48. Comparaison des moyennes de 30 ans des H_{r_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	115
Figure 49. Comparaison des moyennes de 30 ans des P_s entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	117
Figure 50. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_s} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	118
Figure 51. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{min_s} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	120

Figure 52. Comparaison des moyennes de 30 ans des Tmoys entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	122
Figure 53. Comparaison des moyennes de 30 ans des Vs entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	123
Figure 54. Comparaison des moyennes de 30 ans des Hrs entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA	125
Figure 55. Comparaison des moyennes de 30 ans des Rns entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations Sétif et BBA	126
Figure 56. Comparaison des rendements en grain et de la biomasse aérienne de cultivar de BD "Mexicali" observés et simulés par le modèle AquaCrop pour les trois campagnes agricoles (2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013).....	129
Figure 57. Variation des rendements de cultivar de BD "Mexicali" selon les dates de semis pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 sur les deux sites Sétif et BBA.	139
Figure 58. Comparaison de mécanisme cellulaire de la photosynthèse de plantes en C3 et en C4	143

Liste des abréviations

[CO₂] : Concentration en dioxyde de carbone
APSIM: Agricultural Production Systems sIMulator
BBA: Bordj Bou Arreridj
BD : Blé dur
BEI : Besoins en eau d'irrigation
Bi : Biomasse aérienne
BT : Blé tendre
Cc : Couverture de la Canopée
CC : Changement climatique
Cc0 : Canopée initiale de jeune plan à 90% de levée
CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
Ccx : Couverture de la Canopée maximale
Ccx : La canopée maximum
CDC : Coefficient de déclin de la Canopée
CFC : Chlorofluorocarbon
CGC : Coefficient de Croissance de la Canopée
CGIAR: Consultative Group for International Agricultural Research
CIC : Conseil International des Céréales
CMIP5: Coupled Model Inter-Comparison Project Phase 5
CO₂ : Dioxyde de carbone
d : l'Indice d'accord de Willmott
D_{CC} : Durée de cycle de croissance cultivar «Mexicali» de blé dur.
DJC : Degré jour de croissance
DSSAT: Decision Support System for Agrotechnology Transfer
EP : Échec partiel de semis
Eq : Équation
ET : Échec total de semis
ET₀ : Évapotranspiration de référence
FACE : Free Air Concentration Enrichment
FAO: Food and Agriculture Organization
FC: Field capacity
GCM: General circulation model
GES : Gaz à effet de serre
GIEC : Groupe d'Expert Intergouvernemental des Changements Climatiques
GIZ : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

GtCO₂ : Gigatonne de CO₂
Gt_{eq}CO₂ : Gigatonne équivalent CO₂
HI : Indice de récolte de référence
HPO : Hautes plaines orientales
Hr : Humidité relative
Hr_A : Humidité relative moyenne de la saison d'automne
Hr_a : Moyenne annuelle de l'humidité relative
Hr_E : Humidité relative moyenne de la saison d'été
Hr_H : Humidité relative moyenne de la saison d'hiver
Hr_m : Moyenne mensuelle de l'humidité relative
Hr_P : Humidité relative moyenne de la saison de printemps
Hr_s : Humidité relative moyenne saisonnière
INRA : Institut National des Recherches Agronomiques
MADR : Ministère de l'agriculture et du développement rural
MAT : Ministère de l'Aménagement du Territoire
MCG : Modèle de Circulation Générale
MCR : Modèle de Circulation Régionale
Md\$: Milliard de dollars américains
MEER : Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables
MH : Millions d'hectares
Mj/m² : Milli Joule par mètre carré
MQ : Millions de quintaux
MRE : Ministère des Ressources en Eau
MRE : Ministère des Ressources en eau
NAO: North Atlantic Oscillation
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
NRC: Norwegian Refugee Council
NRMSE: Normalized Root Mean Square Error
OECD: Organization for Economic Co-operation and Development
OMM : Organisation météorologique mondiale
ONM : Office national de la météorologie
P : Précipitation
P_A : Précipitations de la saison d'automne
P_a : Précipitations moyenne annuelle
PBD_N : Production nationale totale en blé dur
PBD_w : Moyenne interannuelle de la production de blé dur par wilaya
PBT_N : Production nationale totale en blé tendre

PBT_W : Moyenne interannuelle de la production de blé tendre par wilaya
 P_{CC} : Précipitations durant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé
 P_E : Précipitations de la saison d'été
 P_H : Précipitations de la saison d'hiver
 P_m : Moyenne mensuelle des précipitations
 P_P : Précipitations de la saison de printemps
ppd : Une partie par milliard
PR: période de référence.
 P_s : Précipitation moyenne saisonnière
PWP : Permanent wilting point
 RBD_N : Rendement moyen national de blé dur
 RBD_W : Rendement moyen de blé dur par wilaya
 RBT_N : Rendement moyen national de blé tendre
 RBT_W : Rendement moyen de blé tendre par wilaya
RCM: Regional climate model
RCP : Representative Concentration Pathway
RE4 : Quatrième rapport d'évaluation de GIEC
RMSE : Root Mean Square Error
 Rn_A : Rayonnement solaire net incident moyen de la saison d'automne
 Rn_E : Rayonnement solaire net incident moyen de la saison d'été
 Rn_H : Rayonnement solaire net incident moyen de la saison d'hiver
 Rn_P : Rayonnement solaire net incident moyen de la saison de printemps
 Rn : Rayonnement solaire net incident.
 Rn_a : Moyenne annuelle de rayonnement solaire net incident.
 Rn_{CC} : Rayonnement net solaire incident durant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé
 Rn_m : Moyenne mensuelle de rayonnement solaire net incident
 Rn_s : Moyenne saisonnière de rayonnement solaire net incident
S1: Scenario RCP 4.5 (2035-2064)
S2: Scenario RCP 4.5 (2064-2094)
S3: Scenario RCP 8.5 (2035-2064)
S4: Scenario RCP 8.5 (2065-2094)
SAT : Saturated hydraulic conductivity
 $SRBD_N$: Superficie totale nationale récoltée en blés (blé dur et tendre ensemble).
 $SRBD_W$: Moyenne interannuelle de la superficie récoltée en blé dur de chaque wilaya
 $SRBT_N$: La superficie nationale totale récoltée en blé tendre

SRBT_W: Moyenne interannuelle de la superficie récoltée en blé dur de chaque wilaya

SRES : Special Report Emissions Scenarios.

SRT_W: Moyenne interannuelle de la superficie récoltée en blé tendre de chaque wilaya

TAW: Total amount of available water contained in the soil

T_{CC}: Températures moyennes durant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé

T_{max} : température maximale

T_{max_a} : Moyenne annuelle de la température maximale

T_{max_A} : Températures maximales de la saison d'automne

T_{max_E} : Températures maximales de la saison d'été

T_{max_H} : Températures maximales de la saison d'hiver

T_{max_m} : Moyenne mensuelle des températures maximales

T_{max_P} : Températures maximales de la saison de printemps

T_{max_s} : Température maximale moyenne saisonnier

T_{min} : température minimale

T_{min_a} : Moyenne annuelle de la température minimale

T_{min_A} : Températures minimales de la saison d'automne

T_{min_E} : Températures minimales de la saison

T_{min_H} : Températures minimales de la saison d'hiver

T_{min_m} : Moyenne mensuelle des températures minimales

T_{min_P} : Températures minimales de la saison de printemps

T_{min_s} : Température minimale moyenne saisonnière

T_{moy} : Température moyenne

T_{moy_a} : Température moyenne annuelle

T_{moy_A} : Températures moyennes de la saison d'automne

T_{moy_E} : Températures moyennes de la saison d'été

T_{moy_H} : Températures moyennes de la saison d'hiver

T_{moy_P} : Températures moyennes de la saison de printemps

T_{moy_s} : Température moyenne saisonnière

Tr : Le coefficient de transpiration de la plante

Tri: Transpiration journalière

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

UNISDR: United Nations Office for Disaster Risk Reduction

V : Vitesse de vent

V_a: Moyenne annuelle de la vitesse de vent

V_A : Vitesse moyenne de la saison d'automne

V_E : Vitesse moyenne de la saison d'été

V_H : Vitesse moyenne de la saison d'hiver

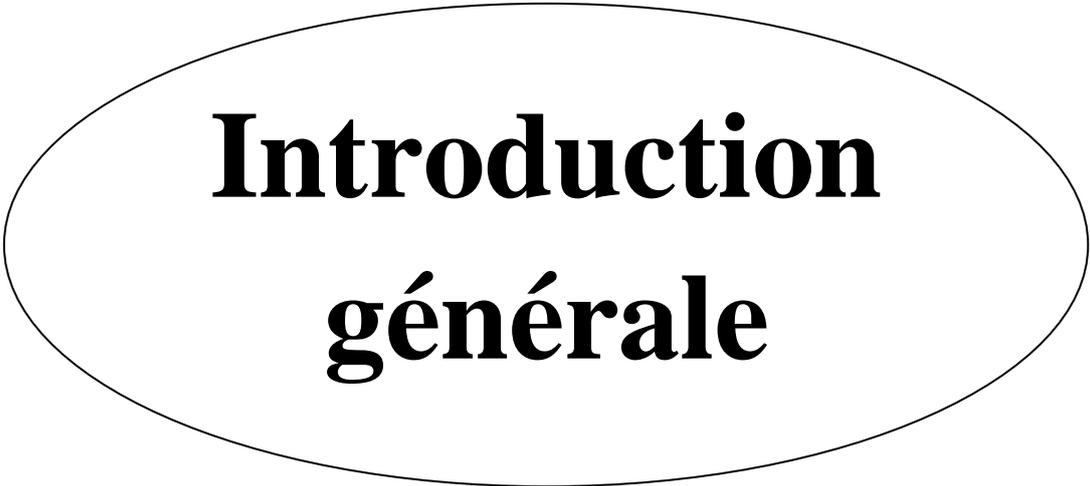
V_m : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent.

V_P : Vitesse moyenne de la saison de printemps

W/m^2 : watt par mètre carré.

WP^* : Productivité en eau des cultures normalisée

WP : Productivité de l'eau du blé dur



**Introduction
générale**

Introduction générale

Les céréales occupent une place importante sur le plan nutritionnel, social, économique et politique dans la plupart des pays du monde (Curtis et al., 2002 ; Ammar, 2014). En Algérie, la céréaliculture en particulier le blé, est considéré comme un produit alimentaire de première nécessité, durant des décennies. Les céréales sont des denrées alimentaires riches en glucide, en Algérie et comme dans la majorité des pays africains, les céréales fournissent près de 70% de l'apport énergétique de la population, ce chiffre ne dépasse pas 40% aux États-Unis (FAO, 1987). Selon cette même source, tous les grains des céréales, ont à peu près la même structure et la même valeur nutritive ; ainsi 100 g de grains entiers, apportent environ 350 Kcal, 8 à 12 g de protéines, des quantités utiles de calcium, de fer et de vitamines B. Les blés (dur et tendre) sont les céréales les plus commercialisées sur les marchés internationaux. Les pays en développement, négocient près de 80% de toutes les importations des blés (FAO, 2003). L'Algérie fait partie des cinq pays importateurs mondiaux de blés (Ammar, 2014). La production annuelle, des céréales en Algérie, a atteint ces dernières années, une moyenne de 40 millions de quintaux par an alors, qu'elle n'a pas dépassé 10 millions de quintaux en 2000. En 2019, le pays a produit 56 millions de quintaux (Mq), il a importé près de 119 Millions de quintaux et a injecté 2,7 milliards de dollars (\$) pour ses achats céréaliers (MADR, 2020). Bensemane et al. (2011) ont estimé que 50% des terres non irriguées en Algérie, sont cultivées par des céréales principalement, le blé dur (BD). Ces terres situées principalement, en hautes plaines semi-arides, produisent le plus souvent moins de 10 q/ha (Beauval, 2017). Cet environnement où les précipitations changent d'année en année, caractérisent des stress hydriques (de l'ordre de 80%) et des stress thermiques qui se différencient par leur intensité, leur durée et leur période d'apparition par rapport au cycle de la culture (Smadhi, 2011). Ces aléas climatiques qui contribuent à réduire significativement les productions agricoles par rapport à la normale seront aggravés par les impacts négatifs du changement climatique (CC) futur prédit pour l'Algérie. Cependant, les études relatives qui évaluent l'impact de CC futur sur l'évolution de la production du BD, sont presque inexistantes, exception faite pour deux études, en dépit du rôle stratégique de la production du BD, dans la sécurité alimentaire de pays. La première étude est celle de Rezzoug et Gabrielle (2015) qui ont utilisé le modèle DSSAT, pour simuler les rendements de BD pluvial pour deux horizons futurs 2021 et 2050, sous les scénarios SRES A2 et B, dans les hautes plaines occidentales de Tiaret. La deuxième étude, est celle de Chourghal et al. (2015), qui ont simulé les rendements du BD pluvial sous le scénario moyen SRES A1B, pour les horizons 2071 et 2100, pour deux sites expérimentaux 'Bordj Bou Arreridj (BBA) et Alger. Ces auteurs ont déduit que vers la fin de 21ème siècle, BBA serait plus favorable à la culture du blé pluvial qu'Alger ; alors que la FAO et

l'OECD (2018), souligne qu'avec le CC, les régions à basse latitude où le climat est aride, les pertes de rendement devraient être plus grandes alors que les zones situées dans des latitudes élevées auraient tendance à observer de légères pertes de rendement ou même des gains de rendement. Cependant, les impacts seront spécifiques aux sites étudiés et varieront selon les cultures et les régions.

L'évaluation de l'ampleur de l'impact du CC sur la production agricole, est complexe et incertaine en raison de la complexité de la compréhension de l'interaction entre les différentes variables climatiques, à savoir la température, le CO₂ dans l'atmosphère et les précipitations, qui pourraient avoir à la fois des effets positifs et négatifs sur les rendements des cultures comme le suggère Rashid et al. (2019).

Dés le début des années 1990, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), a montré que la température moyenne mondiale, a connu un réchauffement de 0,78 °C sur la période de 1850 à 2012, ce réchauffement pourrait être induit par le passage de la concentration en CO₂ [CO₂] dans l'atmosphère de 278 ppm à 379 ppm. Les prévisions pour la fin du 21^{ème} siècle, se situera entre 1,5°C et 2°C (UNFCCC, 2007a ; GIEC, 2013). Au cours des dernières décennies, les températures ont augmenté en Afrique à un rythme un peu plus rapide que la température moyenne du globe. L'année 2019 a été l'une des trois années les plus chaudes jamais constatées sur le continent (OMM, 2020).

Selon le GIEC (2018) et l'OMM (2019), le réchauffement, la variabilité des précipitations associée aux risques climatiques dont une plus grande fréquence d'événements extrêmes, ont aggravé l'insécurité alimentaire dans plusieurs régions du monde surtout en Afrique.

Pour comprendre le CC et ses impacts potentiels sur l'agriculture, Tomozeiu et al. (2013) ; Liu et al. (2018) ont rapporté que les méthodes de descente d'échelle, permettent de projeter les conditions climatiques futures sur une grille très fine à l'aide des modèles de circulation régionaux (MCR). Tandis que Choudhary (2018), a indiqué que la croissance et le rendement des cultures pourraient être simulés avec précision à l'aide des modèles bioclimatiques en décrivant la dynamique du système sol-eau-plante-atmosphère. Il est donc possible d'évaluer l'impact des CC futurs sur la production agricole en associant des modèles climatiques à des modèles bioclimatiques (Xiao et al., 2018). De nombreuses études de ce type ont été menées à travers le monde (Admassu et al. 2012; Gharibdousti et al., 2019; Hernandez-Ochoa et al., 2018; Cammarano et al., 2012; Ahmad et al., 2019). Parmi ces modèles bioclimatique figure AquaCrop, un modèle de simulation de croissance et des rendements des cultures développé par la FAO pour évaluer l'effet de l'environnement et de la gestion de la parcelle sur la production agricole (Vanuytrecht et al. 2014). Silva et al. (2017) ont souligné que le modèle Aquacrop est moins exigeant en données d'entrées (input) et la facilité de son déroulement permet de généraliser son

application pour simuler le rendement de cultures diverses dans des environnements très différents à travers le monde.

Selon MATE (2015), les projections du scénario IS92 pour 2030 pour l'Algérie, il est prévu une augmentation de la température de l'air de 0,9-1,3 ° C, de la variabilité de la température, de la fréquence des vagues de chaleur et de la variabilité des précipitations qui entraînera une augmentation dans les épisodes secs et humides de 10%; mais projetait une diminution des précipitations de 9 à 14%. Ces changements attendus seront modérés dans les régions côtières mais seront plus accentués vers les régions continentales. Le secteur agricole en Algérie, sera le plus touché par le CC futur, et une baisse de - 10% des rendements est prévue en 2030 par le ministère de l'Agriculture, ce qui affectera considérablement la sécurité alimentaire de pays. Cependant, dans un scénario climatique défavorable, une perte de rendement plus importante du blé (31- 39%) est projetée à l'horizon 2030 (MEER et GIZ, 2019).

Dans ce contexte, cette recherche, tente de comparer le climat actuel (période de référence (PR) 1981-2010) au climat simulé pour deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094 sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, dans deux stations météorologiques représentatives des wilayas de Sétif et de BBA, appartenant aux Hauts plaines orientales (HPO) à climat semi- aride (Kourat, 2015).

Le but est d'évaluer l'impact du CC futur sur l'évolution du rendement du BD en pluvial, et sur sa productivité de l'eau et afin de pouvoir établir une stratégie d'adaptation de cette culture stratégique face au CC futur.

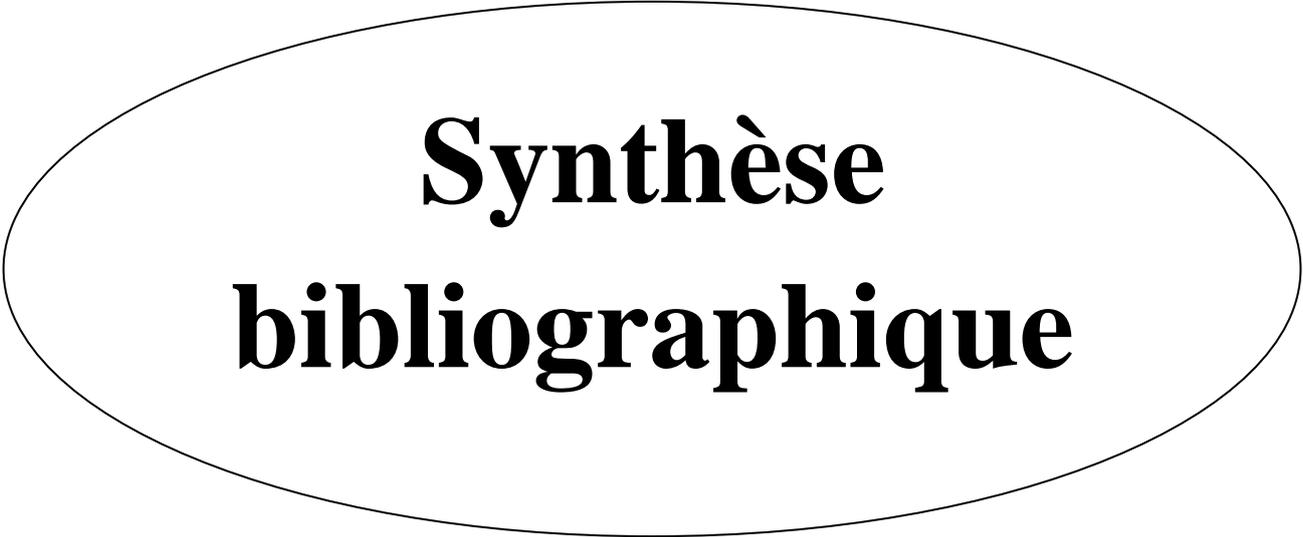
Ce travail de recherche est construit comme suit :

Une première partie, consacrée à une « Synthèse bibliographique» relative aux CC et ses répercussions sur les productions agricoles notamment sur les cultures pluviales, tel que la céréaliculture, dans le monde et en Algérie.

La deuxième partie est dédiée aux « Matériel et Méthodes», elle récapitule les différentes méthodes et approches appliquées, pour simuler et analyser l'évolution des séries de données climatiques et agricoles (BD) actuelles et futur, utilisées dans ce travail de recherche.

La troisième partie «Résultats et discussions », est consacrée à exposer les principaux résultats obtenus lors de cette recherche, en les comparant aux résultats d'autres études similaires faites à travers le monde.

Cette thèse se termine par une **conclusion générale** qui synthétise les principaux résultats qui ressortent de cette étude et les perspectives de recherches à entreprendre à l'avenir.



**Synthèse
bibliographique**

Chapitre 1 : Changement climatique actuel observé et futur projeté dans le monde et en Algérie

1. Introduction

Afin de faire la distinction entre le CC et la variabilité naturelle de climat, la compréhension de l'origine naturelle et anthropique de CC s'impose. Ainsi ce chapitre est consacré à faire un recueil de la littérature qui analyse les origines naturelles et anthropiques de CC et l'historique sur la prise en conscience de CC. Pour confirmer le CC observé, le climat actuel est comparé au climat passé à l'échelle globale et en Algérie, pour ressortir le CC observé. Dans ce chapitre est expliquée la méthodologie suivie dans la modélisation de climat futur, la typologie des scénarios futurs de CC et les méthodes appliquées dans la correction des biais des projections climatiques.

2. Quelques définitions

2.1 Définition de changement et de variabilité climatique

La variabilité climatique comprend toutes les variations du climat qui durent plus longtemps que les événements météorologiques individuels, alors que le terme changement climatique ne fait référence qu'aux variations qui persistent pendant une période plus longue, généralement des décennies ou plus. Depuis la révolution industrielle, le climat a été de plus en plus affecté par les activités humaines qui provoquent le réchauffement climatique et le changement climatique (NRC, 2010). Les impacts du réchauffement planétaire commencent déjà à être détectés dans de nombreuses régions du monde et devraient s'accélérer au cours des prochaines décennies (GIEC, 2013).

2.2. Définition de réchauffement planétaire

Le réchauffement planétaire fait exclusivement référence à l'augmentation à long terme de la température moyenne de la terre, il peut s'agir spécifiquement d'un réchauffement dû à l'influence des hausses des concentrations croissantes des GES dans l'atmosphère (Wheeler et Braun, 2013). Ces GES comprennent: le dioxyde de carbone (CO₂) (provenant de la combustion des produits fossiles tel le charbon et le pétrole), le méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O) (issus des émissions de l'agriculture par le changement d'occupation de sol, l'élevage intensif et l'utilisation des engrais et l'ozone (O₃) (généralisé principalement par les rejets des voitures) et les chlorofluorocarbures (CFC) (GIEC, 1997).

3. Les origines de changement climatique

3.1 Origines naturelles

3.1.1.Éruptions volcaniques

Le principal effet des volcans sur le climat est un refroidissement à court terme. Les éruptions volcaniques dégagent des nuages de poussière et cendres, qui bloquent la lumière du soleil. Parce que les particules de cendre sont relativement lourdes, elles tombent au sol en trois mois environ, donc leur effet de refroidissement est de très courte durée. Mais les débris volcaniques comprennent également le dioxyde de soufre. Ce gaz se combine avec la vapeur d'eau et la poussière dans l'atmosphère pour former des aérosols de sulfate, qui réfléchissent la lumière du soleil loin de la surface terrestre. Ces aérosols sont plus légers que les particules de cendre et peuvent rester dans l'atmosphère pendant un an ou plus. Leur effet rafraîchissant l'emporte sur le réchauffement causé par les GES volcaniques, à titre d'exemple, l'éruption de mont Pinatubo en 1991 a provoqué une baisse de - 0,5°C de la température mondiale (NOAA, 2020).

Les éruptions volcaniques dégagent de la lave, des cendres et particules de CO₂. Bien que le CO₂ ait un effet de réchauffement, les émissions de CO₂ volcanique moyennes représentent moins de 1% des émissions des activités humaines actuelles (Textor et al., 2004). De grands volumes de gaz et de cendres peuvent influencer les régimes climatiques pendant des années en augmentant la réflectivité planétaire provoquant un refroidissement atmosphérique (Hort et Scharff., 2016).

3.1.2 Courants océaniques

Les océans sont une composante majeure du système climatique. Les différences de densité dans l'eau des océans contribuent à un système de circulation à l'échelle mondiale, également appelé la circulation thermohaline, Ces différences de densité proviennent des écarts de température et de salinité des masses d'eau, d'où le terme de thermo — pour température — et halin — pour salinité, (Wunsch, 2002). Cette circulation est le résultat de deux processus simultanés: des courants de surface chauds transportant de l'eau moins dense loin de l'équateur vers les pôles, et des courants océaniques profonds froids transportant de l'eau plus dense loin des pôles vers l'équateur (Broecker, 1997). Cette circulation thermohaline est généralement liée aux forçages : thermique et halin qui lui donnent son nom, cependant, le mélange turbulent lié au vent et aux marées joue un rôle primordial dans cette circulation, notamment dans la remontée des eaux profondes (Hu et al., 2011). A grande échelle, cette circulation est définie par les scientifiques par la notion de circulation méridienne de retournement ou MOC « Meridional Overturning Circulation» (Wunsch, 2002).

Le système de circulation mondial océanique joue un rôle clé dans la distribution de l'énergie thermique, la régulation du temps et du climat et le recyclage des nutriments et des gaz essentiels

(Toggweiler et Key., 2001). Le changement climatique anthropique est susceptible d'affaiblir la circulation océanique à l'avenir, avec un certain risque de déclencher des changements brusques et /ou irréversibles (Rahmstorf., 2007).

3.1.3 Changements orbitaux de la Terre

Les déplacements et les oscillations de l'orbite terrestre selon la théorie de Milankovic peuvent déclencher des changements climatiques tels que le début et la fin des périodes glaciaires. La dernière période glaciaire a eu lieu il y a environ 12 000 ans et le prochain refroidissement cycle peut commencer dans environ 30 000 ans. Mais les changements orbitaux sont si graduels qu'ils ne sont perceptibles que sur des milliers d'années pas des décennies ou des siècles. La terre fait une orbite complète autour du soleil chaque année. Il est incliné à un angle de 23,5 ° par rapport au plan perpendiculaire de sa trajectoire orbitale (Ruddiman, 2006). Les changements dans l'inclinaison de la terre peuvent conduire à des changements mineurs mais importants du point de vue climatique dans la dureté des saisons, plus d'inclinaison signifie des étés plus chauds et des hivers plus froids; moins d'inclinaison signifie des étés plus frais et des hivers plus doux. Les changements lents de l'orbite terrestre entraînent des changements mineurs mais importants sur le plan climatique, de la dureté des saisons sur des dizaines de milliers d'années. Les rétroactions climatiques amplifient ces petits changements, produisant ainsi des périodes glaciaires (Kaluwin et al., 1998).

3.1.4 Variations de l'activité solaire

Le soleil est la source d'énergie du système climatique terrestre. Bien que la production d'énergie solaire semble constante. A une échelle journalière, de petits changements sur une période prolongée peuvent entraîner des changements climatiques. Certains scientifiques soupçonnent qu'une partie du réchauffement de la première moitié du 20ème siècle était due à une augmentation de la production d'énergie solaire (NRC, 1994). Des études scientifiques (Reid, 1991 ; Friis-Christensen et Lassen, 1991), démontrent que les variations de l'activité des taches solaires ont joué un rôle dans les changements climatiques passés. Ainsi, Eddy (1976) a souligné la coïncidence dans le temps entre le minimum d'activité solaire de Maunder et les températures les plus basses du petit âge glaciaire en Europe et en Amérique du Nord entre 1650-1720. En revanche, Lockwood et al. (2017), reste sceptique à cette théorie de minimum de Maunder et de petit âge glaciaire, et suggèrent qu'il ya un manque d'enregistrement de températures fiables qui démontrent que la glaciation a été d'une échelle globale et pas locale, et même ils ont souligné que les années de gel sont légèrement plus fréquentes avant le début du minimum Maunder et également beaucoup plus fréquentes 65 ans après sa fin.

Le réchauffement climatique actuel ne peut cependant pas être expliqué par les variations solaires. Depuis 1750, la quantité moyenne d'énergie provenant du soleil est restée constante ou légèrement augmentée. Si le réchauffement climatique était causé par un soleil plus actif, les scientifiques s'attendraient à voir des températures plus chaudes dans toutes les couches de l'atmosphère. Ils n'ont observé qu'un refroidissement dans la haute atmosphère, un réchauffement en surface et dans les parties inférieures de l'atmosphère. Cela est dû au fait que les GES captent la chaleur dans la basse atmosphère. De même, les modèles climatiques qui incluent les changements de rayonnement solaire ne peuvent pas reproduire la tendance de température observée au siècle dernier sans inclure une augmentation des GES (Regmi, 2013).

3.1.5 Variabilité interne

Quelques changements dans le climat n'ont pas de déclencheurs externes. Ces changements sont causés par des processus naturels internes de système climatique lui-même (GIEC, 2007a). Un exemple de ces facteurs internes est le cycle El Niño–La Niña, qui peut provoquer un réchauffement et un refroidissement temporaires. Les deux phénomènes affectent les modèles de circulation atmosphérique et influencent le climat mondial (Wills et al., 2020). El Niño et La Niña sont des anomalies climatiques de grande envergure, dans le pacifique équatorial. En réalité, ce phénomène qui touche l'océan pacifique tout entier et est qualifié du terme d'ENSO (El Niño/Southern Oscillation), du fait des variations du niveau de la mer engendrées par le flux des alizés (vent lisses), le courant équatorial ou les contre-courants (Can, 2005)

En situation normale, le long de l'équateur, les alizés près de la surface soufflent du Nord-Est au Nord de l'équateur et du Sud-Est au Sud de l'équateur. En convergeant vers l'équateur, les alizés poussent les eaux superficielles plus chaudes vers l'Ouest le long de l'équateur. Ces eaux s'accumulent donc vers l'Indonésie et le nord de l'Australie, et une vaste pente apparaît à la surface de l'océan. Par continuité, cela provoque, à l'autre extrémité Est de l'océan, une remontée d'eau profonde plus froide, vers les côtes équatoriennes et péruviennes, et qu'on appelle aussi «Upwelling côtier» (McPhaden, 2002). Lorsque les alizés deviennent puissants, le déplacement d'eau chaude vers l'Ouest augmente. Ainsi, l'étendue du courant plus froid près des côtes de l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale prend de l'envergure. C'est La Niña. Durant La Niña, le climat est froid et sec au Pérou et pluvieux et orageux en Australie et en Indonésie (Can, 2004). Inversement, lorsque les alizés faiblissent, l'eau chaude accumulée à l'Ouest reflue vers l'Est. Ce courant d'eau chaude vient alors s'étaler vers les côtes d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale. Provoquant des fortes pluies au Pérou et un froid et une sécheresse en Australie et l'Indonésie, c'est El Niño (Philander, 2001).

3.2 Origine anthropique de changement climatique global

Il est très peu probable que le réchauffement du XXe siècle puisse être expliqué par des causes naturelles. La fin du 20ème siècle a été exceptionnellement chaude. Les reconstructions paléoclimatiques montrent que la seconde moitié du 20ème siècle a probablement été la période de 50 ans la plus chaude de l'hémisphère nord au cours des 1300 dernières années. Ce réchauffement rapide est cohérent avec la compréhension scientifique, de la façon dont le climat devrait réagir à une augmentation rapide des GES, comme celle qui s'est produite au cours du siècle dernier, en revanche, le réchauffement est incompatible avec la compréhension scientifique de la façon dont le climat devrait réagir aux facteurs tels que la variabilité des activités : solaire et volcanique (GIEC, 2007 a).

3.2.1 Effet de serre et bilan énergétique global

Le terme «effet de serre» désigne un phénomène naturel dans lequel la température ambiante de la terre est maintenue à environ 33°C plus élevée qu'elle ne le serait si l'effet de l'atmosphère n'était pas pris en compte (Harvey, 2000). Cela signifie que la biosphère actuelle et les biotes concurrentes (y compris l'humanité) n'existeraient pas sans cet effet. Le processus implique un apport non entravé de rayonnement solaire qui chauffe la surface de la terre. Cette dernière, à son tour, émet un rayonnement à ondes longues qui est ensuite absorbé par des gaz spécifiques dans l'atmosphère, dont une partie est réémise à la surface. Il en résulte une surface et une atmosphère plus chaudes que si l'énergie des ondes longues quittait librement l'atmosphère (Robinson et Henderson-Sellers, 1999). Les principaux gaz auxquels l'effet de serre peut être associé sont ceux qui sont capables d'absorber et de réémettre un rayonnement; les plus importants d'entre eux sont H₂O, CO₂, O₃, CH₄ et NO₂ (dioxyde d'azote). Ce sont ces gaz qui augmentent en réponse aux activités anthropiques telles que la combustion des énergies fossiles au niveau mondial, le changement d'occupation des sols, ainsi que l'intensification de la production agricole. Les changements dans les concentrations atmosphériques de ces GES, ainsi que le rayonnement solaire, ont été impliqués dans la modification du bilan énergétique de la terre et, indirectement, dans la modification de la température globale (Hansen et al. 2005). Les principaux flux d'énergie du système mondial sont illustrés sur la Figure.1.

Le déséquilibre énergétique sur une période de six ans allant de 2005 à 2010 est de $0,59 \pm 0,15$ W/m² (énergie excédentaire absorbée par rapport à celle émise dans l'espace). Cette quantité d'énergie est attribuée à une réduction de la quantité de rayonnement infrarouge perdue par l'atmosphère dans l'espace; procédé appelé «effet de serre». Ce changement dans le bilan énergétique mondial peut modifier à la fois le timing et la variabilité des schémas climatiques

mondiaux, augmentant la température de l'air ainsi que l'impact sur le timing et l'intensité des précipitations Hansen et al. (2011).

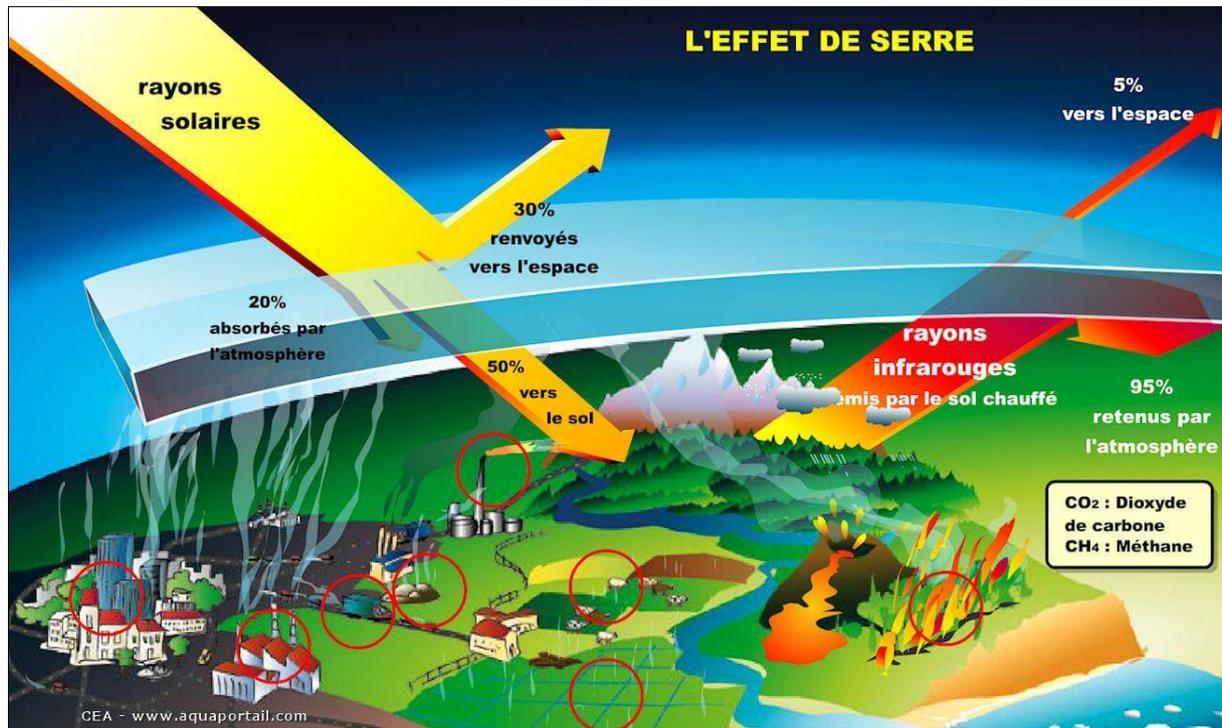


Figure 1. Effet de serre (Source : www.aquaportail.com)

3. 2.2 Évolution des concentrations de GES dans l'atmosphère

Selon le cinquième rapport d'évaluation (RE5) de GIEC. (2013), la concentration des GES : CO₂, CH₄ et N₂O a augmenté d'une manière intense dans l'atmosphère en raison des émissions engendrées par l'activité humaine depuis l'époque préindustrielle (Figure.2). Le cumul des émissions atmosphériques anthropiques de CO₂ entre 1750 et 2011 s'élève à $2\,040 \pm 310$ GtCO₂. Environ 40 %, de ces émissions sont restées dans l'atmosphère (880 ± 35 GtCO₂), le reste se trouve stocké dans la végétation et le sol ainsi que dans l'océan. Ce dernier a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂, ce qui a provoqué une acidification de ses eaux. Environ la moitié des émissions anthropiques de CO₂ cumulées entre 1750 et 2011 ont été produites durant les 40 dernières années de cette période (Figure. 2)

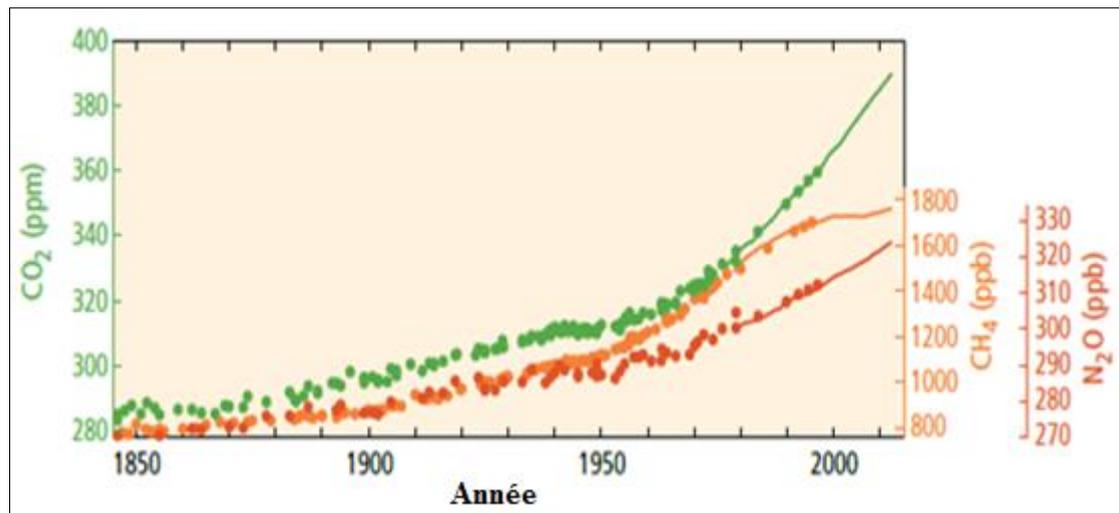


Figure 2. Émission mondiale des GES durant la période 1850-2000 (Source GIEC. 2014)

La Figure.3, représente le total annuel des émissions anthropiques des (GES) (gigatonne d'équivalent CO₂ par an, Gt_{eq}CO₂/an) durant la période 1970–2010 par groupe de gaz: CO₂ issu de l'usage des combustibles fossiles et des procédés industriels; CO₂ issu de la foresterie et d'autres affectations des terres (FAT); CH₄; N₂O); gaz fluorés (gaz F) réglementés en vertu du protocole de Kyoto. À droite sont représentées côte à côte les émissions de 2010 en équivalent CO₂, suivant des pondérations établies à partir d'une part des valeurs du deuxième Rapport d'évaluation du GIEC (RE2) et d'autre part des valeurs du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (RE5).

Selon la Figure.3, le total mondial des émissions anthropiques des GES a continué d'augmenter entre 1970 et 2010, avec une hausse en valeur absolue plus marquée entre 2000 et 2010, en dépit des politiques mises en œuvre en faveur de l'atténuation du changement climatique. Les émissions anthropiques annuelles des GES ont atteint 49 (± 4,5) Gt_{eq}CO₂ en 2010. Les émissions de CO₂ imputables à l'usage de combustibles fossiles et aux procédés industriels ont contribué dans une proportion de 78 % à l'accroissement du total mondial des émissions de GES entre 1970 et 2010, ce pourcentage demeurant identique entre 2000 et 2010. Globalement, les croissances économiques et démographique, continuent d'être les moteurs les plus importants de l'augmentation des émissions de CO₂ dues à l'utilisation des combustibles fossiles. Entre 2000 et 2010, la contribution de la croissance démographique est restée à peu près identique à celle des trois décennies précédentes, tandis que la contribution de la croissance économique est montée en flèche (GIEC, 2014).

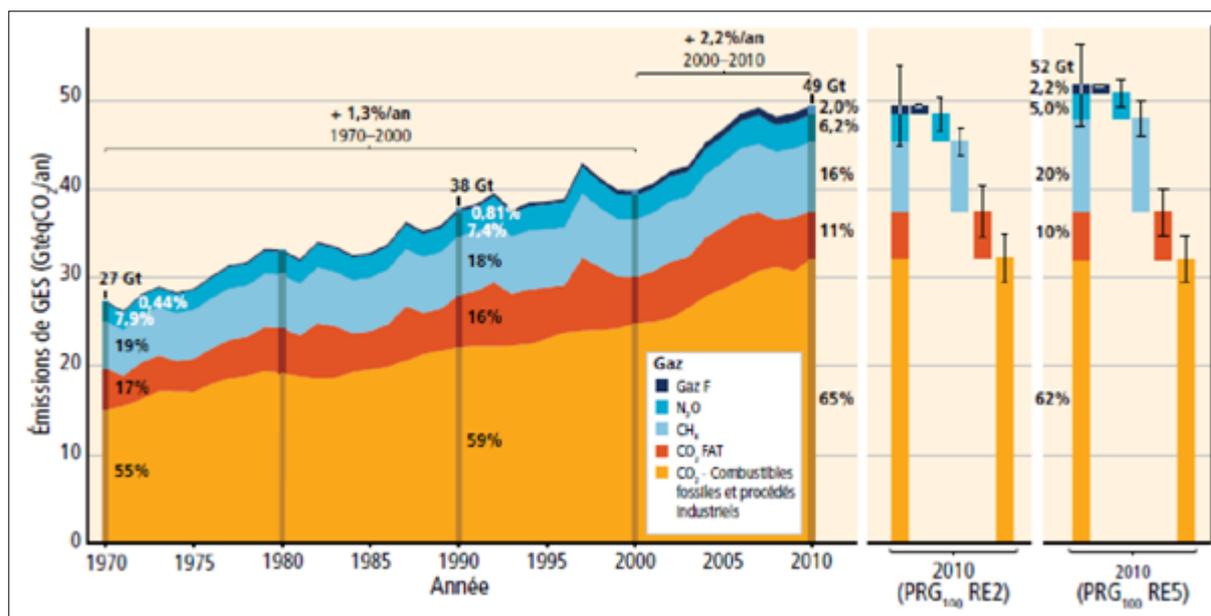


Figure 3. Total des émissions anthropiques de GES entre 1970 et 2010 (Source : GIEC. 2014)

3.3 Chronologie d'une prise de conscience mondiale du changement climatique anthropique

Le terme "effet de serre" fut utilisé la première fois par le physicien français Joseph Fourier en 1827, pour décrire la rétention partielle dans l'atmosphère des radiations solaires. Ensuite en 1896, Svante August Arrhenius constate que les hommes et leur civilisation industrielle sont à l'origine d'une part importante du CO₂ présent dans l'atmosphère, et que la proportion de celui-ci croît en fonction des consommations de charbon (Yotova, 2009). En 1958, Keeling de son côté, s'aperçoit vite que les GES se répartissent pas uniformément dans tout endroit de la terre, et ne reste pas confinés aux seuls continents industrialisés. Les taux en CO₂ ne cessent de croître (Kellogg, 1987). En 1967, deux scientifiques prévoient le doublement de la [CO₂] d'ici le début du XXI^{ème} siècle et une élévation de la température moyenne globale de 2,5°C (Gao et al., 2017). L'année 1988 est marquée par la création de Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ou GIEC. Ce dernier réunit 130 pays, composé de trois groupes : le Groupe I : étudie les principes physiques du CC; le Groupe II : étudie les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au de CC et le Groupe III : étudie les moyens d'atténuer (mitigation) de CC (GIEC, 2010).

En 1992, s'est tenu le Sommet de Rio entérine qui a abouti à la création de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). En 1995, le GIEC estime que « l'étude des preuves suggère une influence détectable de l'activité humaine sur le climat planétaire ». À Kyoto, en 1997, lors de la 3^{ème} Conférence des Parties (COP), 38 pays industrialisés s'engagent dans le protocole de Kyoto à réduire leurs émissions de GES de 5,2% globalement, au cours de la période allant jusqu'en 2012. Ainsi en 2005, l'entrée en vigueur du Protocole de

Kyoto, ratifié par 141 pays dont 36 pays industrialisés sont dans l'obligation de réduire leurs émissions, les pays en développement n'ont que de simples obligations d'inventaires d'émissions. Les États-Unis et l'Australie, qui émettent plus du tiers des GES mondiaux, ne sont pas signataires (UNFCCC, 2007 b)

En 2006, l'économiste britannique Nicholas Stern estime que l'effort nécessaire pour limiter les émissions de GES à 500-550 ppm serait de 1% du PIB annuel global, et que ne rien faire coûterait à l'humanité vingt fois plus (Stern, 2006). Le nouveau rapport du GIEC de 2007 (GIEC, 2007 a), conclut que l'essentiel de réchauffement planétaire depuis le milieu du XXème siècle est « très vraisemblablement » dû à l'augmentation observée des GES émis par l'Homme. Le taux de certitude est supérieur à 90 %, contre 66 % en 2001.

A Bali, en 2008, un nouveau cycle de négociations internationales est ouvert. Celui-ci doit prendre fin en 2009 à Copenhague, où un accord international de réduction des émissions de GES doit prendre le relais du Protocole de Kyoto qui expire en 2012. A la COP15 – Copenhague, en 2009 ; il y a eu la négociation internationale pour définir l'après 2012 (remplacer le protocole de Kyoto), cette COP a abouti à l'obtention d'un accord international - Chine et USA pour la réduction des GES, mais non contraignant. Ensuite, en 2012 à Doha l'hors de la COP18, une seconde période d'engagement du Protocole de Kyoto est décidée jusqu'en 2020 (IISD, 2009).

Le GIEC dans son cinquième rapport (GIEC, 2014) publié en 2014, parle de risques « élevés à très élevés » en cas de hausse moyenne des températures de + 4° C par rapport à la période préindustrielle, parmi ces risques : extinction substantielle d'espèces et risques importants pour la sécurité alimentaire, ce rapport évoque des risques « considérables » dès un réchauffement de + 1 à + 2°C, et qu' une augmentation d'environ + 2°C par rapport à la période préindustrielle pourrait causer une perte d'environ 0,2 et 2 % des revenus annuels mondiaux.

En 2015 s'est tenu la COP 21 et signature de l'Accord de Paris, qui prévoit principalement de limiter l'augmentation de la température à 2°C voire d'aller vers l'objectif de 1,5° par rapport à l'ère préindustrielle, et ce par des engagements de la part de chacun des 195 pays signataires et l'Union Européenne, pour réduire les GES et aussi par la création d'un fonds vert pour le climat de 100 milliards de dollars par an à partir de 2020, financé par les pays développés pour aider les pays en développement à s'adapter d'une manière durable au changement climatique (Ambrósio et al., 2016).

En 2018, le GIEC a publié son rapport spécial (GIEC, 2018) sur le réchauffement de 1,5°C qui était alarmant et appel à un changement radical. En septembre 2019, à Monaco, le GIEC a publié son dernier rapport sur l'océan et la cryosphère approuvé par les 195 pays signataires, ce rapport met l'accent sur les résultats de 700 études alarmantes sur les grands risques causés par le

réchauffement climatique anthropique sur les zones montagneuses, les zones côtières et les zones polaires (GIEC, 2019).

4. Changements climatiques observés à l'échelle globale et en Algérie

4.1. A l'échelle globale

Le climat est généralement décrit en termes de paramètres clés comprenant la température, les précipitations et le vent sur une période de temps prédéterminée (Le Treut et al., 2007).

4.1.1 Changement observé sur les températures

Les changements de température globale ont été à l'épicentre de l'analyse du CC, offrant les preuves les plus solides à l'appui de la théorie du CC anthropique. L'analyse des carottes de glace à Vostok (Antarctique) a révélé que les évolutions de la température globale et de la concentration atmosphérique en CO₂ ont une corrélation très claire comme indiqué dans la Figure.4. Si les causes en sont encore mal comprises, on estime que perturber l'un de ces deux paramètres conduit à perturber l'autre.

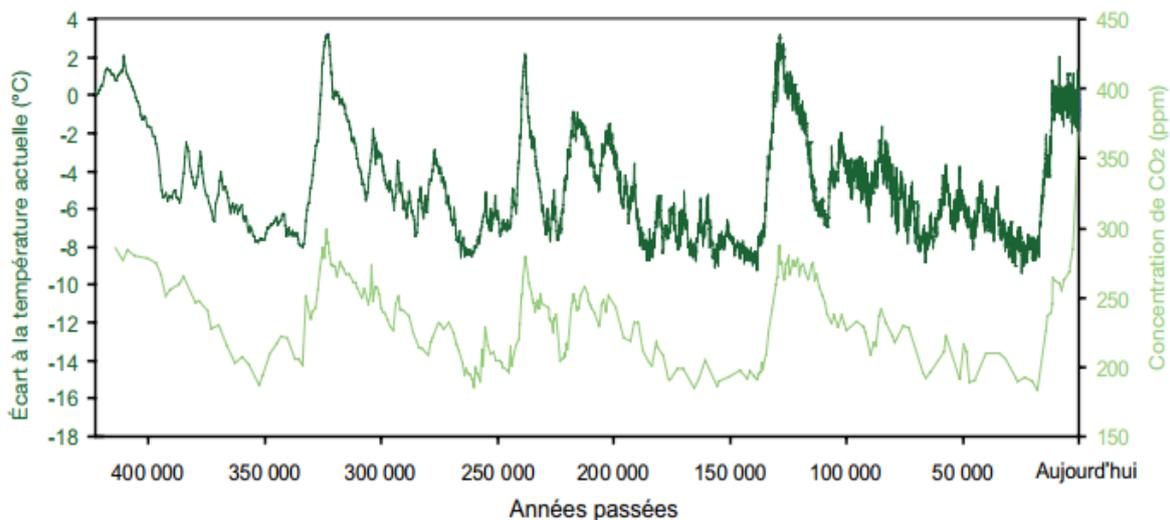


Figure 4. Température et concentration de CO₂ dans l'atmosphère au cours des 400 000 dernières années avant l'ère industrielle (Source : World Data Center for Paleoclimatology, Boulder & NOAA Paleoclimatology Program)

La Figure.5 montre les anomalies globales des températures moyennes en surface de la terre et des océans, observées entre 1850 et 2012. Selon les graphes de cette figure, chacune des trois dernières décennies (80, 90 et 2000) a été successivement les plus chaudes à la surface de la terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. À l'exception de l'année 1998, dix des années les plus chaudes enregistrées depuis 1880 (début de l'enregistrement fiable) ont été signalées après 2000 (GISS, 2014). Avec un degré de confiance élevé, la période 1983–2012 est probablement la

période de 30 ans la plus chaude des 800 dernières années dans l'hémisphère Nord, où une telle évaluation est possible. Avec un degré de confiance moyen, elle pourrait être la période de 30 ans la plus chaude des 1 400 dernières années. La tendance linéaire de la moyenne globale des données de température en surface combinant les terres émergées et les océans indique un réchauffement de 0,85 °C au cours de la période 1880–2012. L'augmentation totale de la moyenne entre la période 1850–1900 et la période 2003–2012 est de 0,78°C (GIEC, 2014).

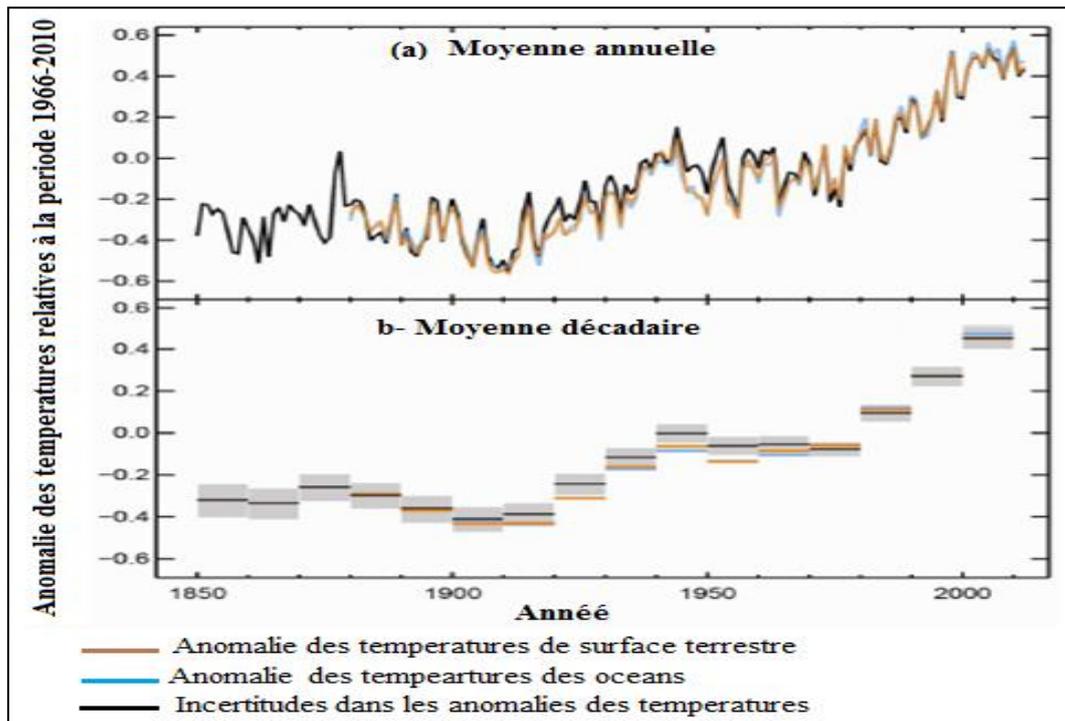


Figure 5. Anomalies des températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans, observées entre 1850 et 2012 (source : GIEC, 2013).

La Figure.6 montre les anomalies globales moyennes combinées de la température de la surface de la terre et des océans pour les quatre dernières décennies en comparaison aux valeurs de référence 1951-1980 (Hansen et al., 2010). Le réchauffement inter-décadaire en moyenne entre chacune de ces décennies est de 0,17°C par rapport au niveau de référence. Le réchauffement est principalement plus prononcé sur les surfaces terrestres, en raison de l'inertie thermique dans les surfaces océaniques (Wild, 2015). La disparité spatiale dans la répartition de ce réchauffement est évidente (Figure.6), le réchauffement le plus important se produisant dans l'hémisphère Nord aux hautes latitudes, ainsi que dans les zones éloignées de l'influence humaine (GISS, 2014). L'augmentation des températures de surface dans l'hémisphère nord s'est accompagnée d'une réduction de l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique, de l'étendue de la calotte glaciaire au

Groenland et dans l'Antarctique, ainsi que de l'élévation concomitante du niveau de la mer (GIEC, 2013). Temporairement, le plus fort réchauffement de l'hémisphère nord se produit au printemps et en hiver.

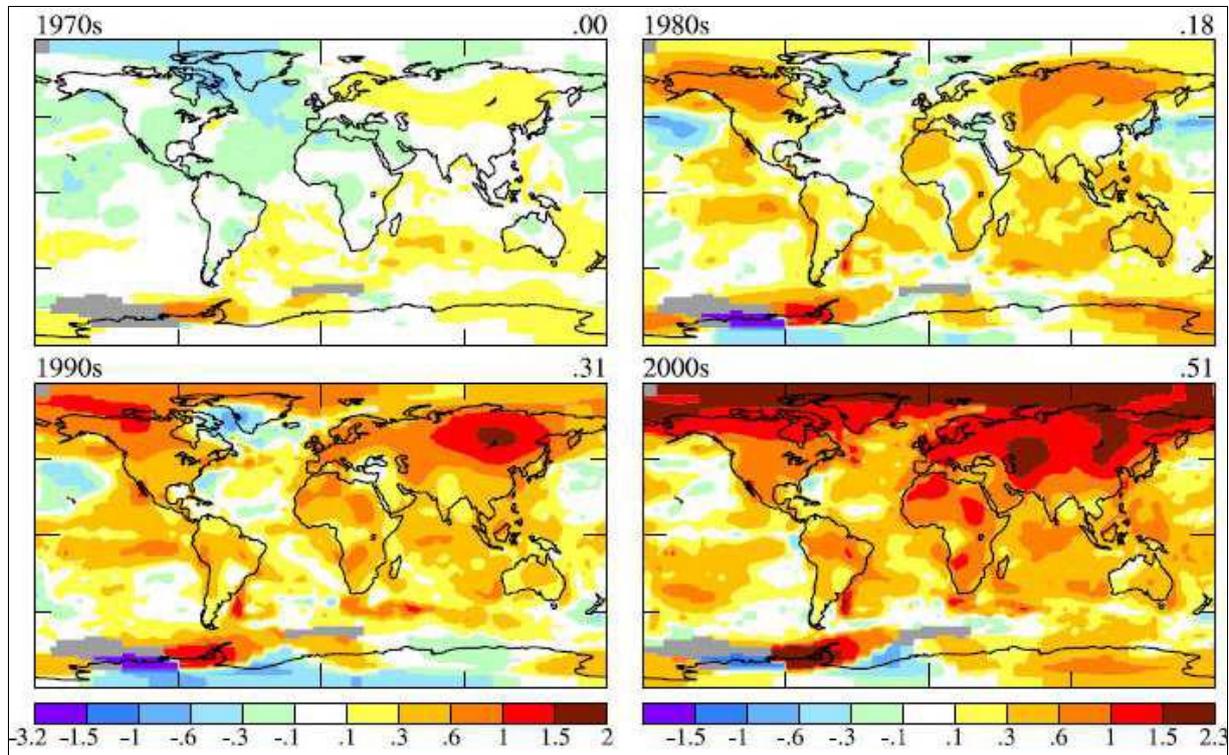


Figure 6. Anomalies décennales de la température de surface de la terre et de l'océan par rapport à la période de référence 1951-1980 (source : Hansen et al., 2010)

4.1.2 Changements observés sur les précipitations

Le RE5 de GIEC, indique qu'il est probable que des influences anthropiques aient affecté le cycle mondial de l'eau depuis 1960. La hausse des températures et l'augmentation correspondante de la vapeur d'eau atmosphérique ont entraîné des modifications du système hydrologique mondial, avec une modification de la configuration des régimes des précipitations mondiaux, il est probable qu'il y a une extension des régions où les précipitations abondantes ont augmenté par rapport à celles où les pluies abondantes ont diminué (GIEC, 2013). Dore (2005), a synthétisé la littérature mondiale relative à l'évolution des régimes des précipitations sur des données observées, sa synthèse a montré que le CC est déjà une réalité. Parmi ses conclusions intéressantes, les zones humides deviennent plus humides et les zones sèches et arides le deviennent davantage. Il a aussi rapporté que les changements suivants sont observés : a) augmentation des précipitations dans les hautes latitudes (hémisphère nord); b) diminution des précipitations en Chine, en Australie et dans les petits États insulaires du Pacifique; (c) une variabilité accrue des précipitations dans les

régions équatoriales et d) changements dans les régimes des précipitations induits par les changements de l'intensité des courants océaniques tel que El Nino et ENSO en Afrique et l'Asie.

4.1.3 Événements météorologiques extrêmes

4.1.3.1 Vagues de chaleurs extrêmes

Les vagues de chaleur sont des périodes de plusieurs jours de températures extrêmement chaudes et considérées parmi les catastrophes naturelles les plus meurtrières. Des études montrent que les vagues de chaleur deviendront plus longues, plus nombreuses et plus intenses avec le réchauffement climatique Baldwin et al., (2019). Des tendances extrêmes en matière de température ont été identifiées, telles que la tendance à des journées ou nuits plus chaudes et aux vagues de chaleur de plus en plus courantes. Les exemples incluent les vagues de chaleur de 2003, 2006 en Europe, ainsi que celle de l'été 2010 en Russie; ce qui a entraîné des pertes généralisées de récoltes et des incendies de forêt (Barriopedro et al., 2011). Selon le RE5 de GIEC (2014), il est probable que les vagues de chaleur ont connu une augmentation de leur fréquence sur une grande partie de l'Europe, de l'Asie et de l'Australie et que l'influence humaine, a contribué à des changements observés à l'échelle du globe, relatifs à la fréquence et l'intensité des extrêmes journaliers de température, depuis le milieu du XXe siècle. Dans ce même rapport, il est indiqué qu'il est même probable que l'influence humaine a plus que doublé la probabilité d'occurrence des vagues de chaleur en certains endroits. Il a été observé une hausse du nombre de décès dus à la chaleur et une baisse des décès dus au froid dans certaines régions du fait du réchauffement planétaire.

Selon l'OMM. (2019), la période quinquennale 2015-2019 est susceptible d'être la période la plus chaude de toutes périodes quinquennales précédentes, avec une augmentation de la température globale de + 1,1°C depuis la période préindustrielle et une augmentation de + 0,2°C par rapport à la période 2011-2015. OMM (2019), rapporte aussi qu'il est désormais confirmé que les années 2015, 2016 et 2017, montrent clairement la tendance au réchauffement sur le long terme, causée par l'augmentation des concentrations atmosphériques en GES, ces trois années sont les plus chaudes jamais enregistrées. Avec + 1,2°C de plus qu'à l'époque préindustrielle, l'année 2016 conserve le statut de l'année la plus chaude. En 2015 et 2017, l'écart de la température moyenne par rapport aux valeurs préindustrielles était de + 1,1°C. La température moyenne en 2017 a dépassé d'environ + 0,46°C la normale (14,3°C) calculée pour la période 1981-2010, cette période est considérée comme une période de référence pour l'étude des changements récents des températures, de vent et des précipitations, auxquels sont sensibles des secteurs comme la gestion de l'eau, l'énergie, l'agriculture et la santé (OMM, 2019).

4.1.3.2 Pluies intense et mousson

D'après Webster et al. (1998), la mousson désigne un système de vents périodiques des régions tropicales, actif particulièrement dans l'océan Indien et l'Asie du Sud. Ce phénomène climatique est souvent accompagné de pluies plus ou moins fortes. Ce cycle annuel de système de vent, se divise en deux phases distinctes : la «phase humide » et la « phase sèche ». La phase humide fait référence à la saison des pluies pendant laquelle un air chaud, humide, et des vents très perturbés soufflent vers l'intérieur des terres tropicales en provenance des océans. La phase sèche fait référence à l'autre moitié de l'année où les vents apportent de l'air frais et sec des continents d'hiver. Cette variation distincte du cycle annuel se produit sur l'Asie, l'Australie, Afrique de l'Ouest et dans les Amériques. Dans la région de la mousson africaine, Fontaine et al. (2011) ont étudié les tendances observées récemment à l'aide des données de précipitations (période 1979-2002), sur une grille à haute résolution. Leurs résultats ont révélé une augmentation des précipitations des moussons d'Afrique du Nord depuis le milieu des années 90. Cependant, à plus long terme, Zhou et al. (2008) et Wang et Ding (2006) ont signalé une tendance générale à la baisse à long terme des précipitations mondiales des moussons terrestres au cours des 54 dernières années, principalement à cause de la diminution des précipitations dans les moussons d'Afrique du Nord et d'Asie du Sud. Pour les régions de mousson américaines, Cavazos et al. (2008) ont signalé une augmentation de l'intensité des précipitations de la mousson nord-américaine dans les sites de montagnes de côté nord-ouest du Mexique durant la période 1961-1998, apparemment liée à une contribution accrue des fortes précipitations issues des cyclones tropicaux. Pour la mousson indienne, Rajeevan et al. (2008) ont montré que les événements pluvieux extrêmes ont une tendance à la hausse entre 1901 et 2005. Ja Ha et al. (2020) a révélé que le changement des précipitations sur la mousson africaine est principalement dû au forçage anthropique et que la mousson d'Asie-Australie est affectée par la variabilité interne de climat.

4.1.3.3 Inondations

Les précipitations ont montré une tendance générale à la hausse en automne et en hiver dans l'hémisphère Nord aux latitudes moyennes et élevées (GIEC, 2001). Par conséquent, il est évident que la fréquence des inondations serait affectée par les changements dans la variabilité annuelle des précipitations et par les changements dans les caractéristiques des précipitations (intensité et durée). Cela appelle une approche plausible et physique pour incorporer les changements induits par le climat dans les procédures conventionnelles d'estimation de la fréquence des inondations (Demissie and Cunnane., 2002). Schaller et al. (2016) ont conclu que le changement climatique avait accru de 43 % la probabilité que se déversent les précipitations à l'origine des inondations. Il est intéressant de noter que de plus en plus d'observations concernant des précipitations

abondantes et des inondations ont été enregistrées non seulement dans les régions où les précipitations totales ont augmenté, mais également dans les zones où les précipitations ont diminué (Trenberth et al., 2007). Selon l'OMS (2015), en plus des décès par noyade, les inondations provoquent des effets indirects importants sur la santé, y compris les impacts sur la production alimentaire, l'approvisionnement en eau, perturbation de l'écosystème, épidémies et maladies infectieuses et propagation des vecteurs. Les effets à plus long terme des inondations peuvent inclure le stress post-traumatique et le déplacement des populations.

4.1.3.4 Sécheresses

Il existe encore de grandes incertitudes quant aux tendances observées à l'échelle mondiale en matière de sécheresse (Nicholls et al., 2012). Le RE4 de GIEC a rapporté sur la base des analyses utilisant l'indice de sécheresse de Palmer (PDSI), que l'étendue des zones très sèches avait plus que doublé depuis 1970 à l'échelle mondiale (Trenberth et al., 2007). Cette évaluation reposait toutefois largement sur l'étude de Dai et al. (2004), seulement. Ces auteurs ont constaté que ces tendances dans le PDSI étaient largement affectées par les changements de température et non par les précipitations. D'autre part, Sheffield et Wood (2008), ont réalisé une étude basée sur des simulations d'humidité du sol avec un modèle de surface terrestre, établi avec des observations d'humidité de sol, durant la période 1950-2000, ainsi ils ont déduit des tendances en matière de durée, d'intensité et de sévérité de la sécheresse, principalement en diminution, mais avec une forte variation régionale et comprenant des augmentations dans certaines régions. Ils ont conclu qu'il existait une tendance générale à l'humidification sur la période considérée, mais également un basculement, depuis les années 1970 vers une tendance à l'assèchement, au niveau mondial et dans de nombreuses régions, en particulier dans les hautes latitudes nord. Autrement, Groisman et Knight (2008) ont constaté que les jours secs consécutifs ont considérablement augmenté dans le sud-ouest des États-Unis. Les sécheresses les plus graves du XX^{ème} siècle se sont produites dans les années 1930 et 1950, aux États-Unis où le Dust Bowl des années 1930 était le plus intense et la sécheresse des années 1950 la plus persistante (Andreadis et al., 2005). Les années 1990 ont été les périodes les plus sèches et les tendances régionales récentes vers des conditions de sécheresse plus sévères ont été identifiées dans le Sud et l'Ouest du Canada, en Alaska et au Mexique, avec des exceptions sous-régionales (Dai, 2010). En Asie, les tendances en matière de sécheresse sont globalement peu fiables, à l'échelle continentale et régionale, en raison principalement de variations spatiales, sauf en Asie de l'Est où de nombreuses études, basées sur différents indices, montrent une sécheresse croissante dans la seconde moitié de 20^{ème} siècle. En Afrique, il a été déduit une augmentation globale de la sécheresse avec une variabilité régionale, la sécheresse prolongée au Sahel est plus marquée dans les années 1970 (Sheffield et Wood, 2008 a ; Dai,

2010). Selon Hulme et al. (2001), même s'il y a aucune tendance apparente à l'échelle du continent en ce qui concerne l'évolution des précipitations au cours du 20ème siècle, bien qu'il y ait eu une sécheresse à l'échelle du continent africain en 1983 et 1984. D'après Kniveton et al. (2009), en Afrique, la saison humide arrive 9 à 21 jours plus tard avec une grande variabilité interannuelle du début de la saison des pluies. En Europe et dans la région méditerranéenne, des études (Kiktev et al., 2003; Haylock et Goodess, 2004; Alexander et al., 2006; Sheffield et Dai, 2010) ont montré qu'une augmentation de la sécheresse en Europe centrale et du Sud, depuis les années 1950, cependant il n'y a aucune tendance dans l'Europe du Nord.

4.1.3.5 Intensification des ouragans, des cyclons et tornades

Le résumé du quatrième rapport de GIEC à l'intention des décideurs (GIEC, 2007 b) a conclu qu'il est probable que l'activité intense des cyclones tropicaux a connu une augmentation, depuis 1970 dans certaines régions. Kunkel et al. (2008) ont suggéré qu'il est probable que la fréquence des tempêtes tropicales, ouragans dans l'Atlantique Nord a augmenté au cours des 100 dernières années, une période au cours de laquelle les températures de surface de l'océan Atlantique ont également augmenté. Les pertes économiques les plus importantes étaient associées aux cyclones tropicaux. En 2017, l'ouragan Harvey dans l'Atlantique a été l'un des plus dévastateurs enregistrés, avec plus de 125 milliards USD de pertes. Dans l'océan Indien, en mars et avril 2019, sans précédent des cyclones tropicaux dévastateurs consécutifs ont frappé le Mozambique (OMM, 2019).

4.2 Changement climatique observé en Algérie

4.2.1 Précipitations

Selon GIEC. (2007.b), les modèles climatiques régionaux appliqués à l'Algérie pour la période 1990-2020, prévoient une diminution des précipitations de - 10%. Taibi et Souag (2012) ont appliqué les trois tests statistiques d'étude de tendance : segmentation Pettitt, Kendall, Hubert, pour étudier l'évolution des précipitations sur le Nord de l'Algérie, durant la période 1937-2009. Cette étude a montré que depuis l'année 1970, une tendance à la baisse des précipitations est particulièrement observée dans la région Ouest de pays, qui a enregistré un déficit pluviométrique d'environ - 30%. Conjointement, Nouaceur et al. (2013), ont étudié les tendances des cumuls pluviométriques annuels durant la période 1970-2012 sur 6 stations de littoral (Oran, Chlef, Dar El beida, Bejaia, Skikda et Annaba), selon les tendances des précipitations, ils ont ressorti trois périodes remarquables, la première est 1970 -1986, généralement humide, regroupant 59 % d'années humides et très humides, 30 % d'années sèches et très sèches, et seulement 11 % d'années normales. La deuxième période 1987-2002, plutôt sèche, caractérisée par 49 % d'années sèches et très sèches, 39 % d'années humides et très humides et 12 % d'années normales. La

troisième période 2003-2012, est caractérisée par une hausse des années humides ou très humides (57 %) et des années normales (22 %). Ainsi, cette dernière période est marquée par le plus faible pourcentage d'années sèches et très sèches (21,3 %), observé depuis 1970.

Autrement, Kourat et Medjerrab (2016), ont utilisé l'approche cartographie automatique, ils ont détecté une tendance à l'aridité de la région des Hautes plaines orientales de l'Algérie, durant la période 1975-2000, par rapport à la période 1913-1938, cette tendance à l'aridité s'est manifestée par la migration des isohyètes supérieures à 400 mm vers le Nord de la région, ils ont aussi démontré l'extension de l'aire touchée par l'isohyète 350-400 mm en 1975-2000 au détriment de l'aire qui était occupée, en 1913-1938, par l'isohyète 400-450 mm. Même résultat est obtenu auparavant par Bachir, (2011), pour cette même région.

4.2.2 Températures

D'après les prévisions de GIEC (2007 b), un passage de la hausse de la température moyenne en Algérie de + 0.8°C à + 1.1°C est prédit pour la période 1990-2020, selon des modèles climatiques régionaux. Taibi et Souag. (2012), dans leur étude de l'évolution des températures moyennes annuelles, durant la période 1937-2009, ont démontré avec un test statistique, appliqué sur quatre séries chronologiques des températures, observées sur des stations météorologiques de littorale (Alger, Annaba, Oran et Chlef), qu'une augmentation des températures moyennes annuelles supérieure à + 0,5°C, est détectée durant les années 80 sur ces quatre stations. Conjointement à ce résultat, ces auteurs ont rapporté que la décennie 1970-1980 a été une période de refroidissement commune à toutes les stations, cependant la décennie 1992-2002 est la décennie la plus chaude avec un réchauffement d'environ + 0,7°C. Nouaceur et al., (2013), ont étudié les tendances des T_{min} et T_{max} durant la période 1970-2012, représentée par 6 stations météorologiques de littoral (Oran, Chlef, Dar El beida, Bejaia, Skikda et Annaba), ainsi ils ont constaté que quatre périodes caractérisent l'évolution des T_{min} et T_{max}: période 1970-1984, pour les T_{min} et 1970-1987 pour les T_{max}, ces deux périodes sont marquées par une prépondérance du nombre d'années très froides et froides. Une deuxième période : 1985-1990, pour les T_{min} et 1987-1990, pour les T_{max}, ces deux séquences correspondent à un intervalle de réchauffement, où la catégorie des années chaudes et très chaudes est bien représentée sur l'ensemble des stations, surtout au cours des quatre dernières années. La période 1991-1993 voit le retour des conditions froides et très froides. La dernière période (1994-2012), caractérisée par une prépondérance d'années très chaudes.

4.2.3. Événements météorologiques extrêmes

4.2.3.1 Sécheresses

En se basant sur le calcul de l'indice standardisé des précipitations (SPI), Taibi et Souag (2012) ont étudié la sécheresse sur 102 stations pluviométriques de Nord de l'Algérie, qui représentent la période 1937-2009, ils ont déduit que la période 1975 à 2001 est caractérisée par un déficit pluviométrique qui a provoqué des sécheresses sévères. Cependant, ils ont conclu que les deux périodes 1936-1975 et 2002-2008 étaient excédentaires (humides). Kourat (2015), a aussi utilisé l'indice SPI pour évaluer la sévérité de la sécheresse annuelle, durant la période 1970-2009, sur 50 stations pluviométriques des Hautes Plaines orientales de l'Algérie. Elle a déduit que la décennie 80 est la décennie la plus sèche, tandis que la décennie 2000 était la plus humide, elle a identifié les années : 1993, 1987, 1996, 2000, 1977 et 1983 comme des années de sécheresse observée dans la majorité des stations, elle a aussi constaté que l'année 1993 est caractérisée par une sécheresse régionale qui affecté 93% des stations étudiées. Brandimarte et al. (2011) ont met en évidence le lien existant entre la sécheresse et l'oscillation Nord atlantique (NAO) dans la région Ouest de l'Afrique de Nord. Il est à rappeler que le NAO désigne un phénomène touchant le système climatique du Nord de l'océan Atlantique, il est lié aux variations du régime océan-atmosphère sur la région et se mesure par l'indice NAO, ce dernier exprime la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Elle est notamment corrélée à l'oscillation arctique (Hurrell, 2003).

Brandimarte et al. (2011) ont associé l'Indice standardisé des précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) à l'indice NAO de la saison d'hiver pour prévoir les sécheresses. Ainsi, il a déduit que si l'indice NAO est positif (NAO +), des moyennes SPEI négatives sont enregistrées en Europe du Sud et dans les régions de Turquie et du Maghreb, ce qui implique l'occurrence des sécheresses dans ces régions. En revanche un indice NAO négatif (NAO -), aboutit à des SPEI positifs, et donc des épisodes pluvieux sont attendus sur ces trois régions mais avec une distribution spatiale moins homogène.

Nouaceur et al. (2013), ont rapporté que la période de forte sécheresse coïncide avec des (NAO +) de forte intensité, qui indiquent un renforcement de l'anticyclone des Açores et d'un creusement de la dépression d'Islande. Dans ces conditions, les dépressions se déplacent vers les latitudes septentrionales, ce qui favorise la mise en place d'un temps sec et doux sur le pourtour du bassin méditerranéen, notamment au Maghreb. Cependant, lorsque un (NAO -) est observé, la pression associée à l'anticyclone des Açores diminue tandis que la dépression d'Islande devient moins creuse. Dans ces conditions, avec une différence de pression faible, les dépressions migrent vers le sud et touche ainsi les régions de la rive sud de la Méditerranée, ce qui favorise l'installation d'un temps pluvieux au Maghreb. En revanche, Meddi et al. (2010), ont démontré

que l'occurrence des sécheresses dans le bassin de Macta, au Nord Ouest d'Algérie, sont liées plus au phénomène El Nino qu'au NAO.

4.2.3.2 Les vagues de chaleur

Les canicules sont devenues de plus en plus longues et fréquentes au cours des trente dernières années, en lien avec le réchauffement climatique. Ainsi, en été 2015, l'Algérie est touchée par une vague de chaleur qui a duré 40 jours consécutifs (El Watan, 2015). Selon Abed et Kerrouche (2017), la définition des vagues de chaleur par l'ONM en Algérie est basée sur des critères arbitraires. Ainsi, selon l'ONM, un BMS de canicule est émis quand la température estivale prévue atteint ou dépasse sur deux (02) jours consécutifs 40°C dans les régions côtières et 44°C sur les régions intérieures et Hauts plateaux. Quant aux régions sahariennes, il est émis pour la température qui atteindra ou dépassera 48°C sur une journée. Ces deux auteurs ont utilisé une autre approche scientifique basée essentiellement sur la durée, l'ampleur et l'écart par rapport à la normale climatologique, qui définit le seuil de température qui déclenche une vague de chaleur sur les quatre saisons et pour chaque wilaya. Cette approche peut aboutir à un système d'alerte efficace en cas d'occurrence des vagues de chaleurs. Ainsi ils ont pu définir la vague de chaleur du 23 au 25 mars de l'an 2001. Faci (2018), a analysé l'évolution des Tmax durant la période 1951-2010, sur cinq stations météorologiques de Sud algérien (Bechar, Biskra, Touggourt, Ghardaïa). Ainsi, leur comparaison des Tmax entre les deux périodes 1951-1980 et 1981-2010, a montré une nette tendance à la hausse du nombre de jours chauds et de canicules, cette augmentation s'est accélérée à partir du milieu des années 1990 dans toutes les stations. Ils ont aussi constaté que la durée de la période d'enregistrement des vagues de chaleur s'est prolongée d'environ quatre semaines au Sahara septentrional et d'environ deux semaines au Sahara central.

4.2.3.3 Inondations

Nouaceur et al. (2013), ont étudié l'évolution des pluies durant la période (1970-2012) sur six stations pluviométriques des villes côtières (Alger, Annaba, Bejaia, Chlef, Oran et Skikda), ils ont constaté, qu'après une forte sécheresse qui a frappé durant la période 1987-2002, un retour à une situation plus humide, s'est fait ressentir depuis l'année 2003, accompagné de fréquents épisodes pluvieux extrêmes (perturbations pluvio-orageuses sévères) qui ont provoqué des inondations. Conjointement, Kourat (2015), a constaté que la fréquence des années extrêmement humides est plus élevée que celles des années extrêmement sèches, durant la période 1970-2009, dans les HPO de l'Algérie. Ces résultats sont confirmés par les inondations tragiques qui ont secoué l'Algérie durant la décennie 2000, dont il ya lieu de citer celles : de Novembre 2001 à Bab El Oued (800 morts), de Mars 2005 à Illizi, Adrar et Tamanrasset, de Février 2006 à Tindouf, d' Octobre 2007

à Béchar, du 18 et 19 avril 2007 à Sidi Bel Abbes (07 morts et 109 familles sinistrées), d'Octobre 2008 à Ghardaïa (50 morts), d'Octobre 2011 qui ont touché toute la partie nord-saharienne dans les : wilayas d'El Bayad (10 morts et 600 Milliards de centimes de dégâts), M'sila, Djelfa, Biskra, Laghouat et El Oued), inondations de Mai 2013 (20 morts) ayant touché tout le littoral d'Ouest en Est, dont figure Alger, où 195 mm de pluies sont enregistrées, durant 24 heures, ce volume est supérieur à celui observé lors de des inondations de 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued, estimé à 159,4 mm, ce qui indique que l'importance des dégâts causés par les inondations ne dépend pas seulement de l'intensité des précipitations mais aussi des aménagements urbains pour lutter contre les inondations (Nouaceur et al., 2013 ; MRE., 2018 ; Djebali., 2015).

5. Modélisation de climat future

Trzaska et Schnarr, (2014) ont précisé que dans l'objectif de répondre aux besoins des décideurs en matière de planification du CC, divers rapports, outils et ensembles de données fournissent des impacts climatiques prévisionnels à des échelles spatiales et temporelles bien plus fines que celles auxquelles les projections sont faites. Il est important de reconnaître la diversité des hypothèses sous-jacentes aux techniques utilisées pour obtenir ces informations et les limites qu'elles imposent aux résultats. Les modèles climatiques sont les principaux outils disponibles pour étudier la réponse du système climatique à diverses contraintes, pour établir des prévisions climatiques sur des échelles de temps saisonnières à décennales et pour établir des projections du climat futur pour le siècle à venir (Flato et al. 2013).

5.1 Les Modèles de Circulation Générale (MCG)

Selon (Khan et Pilz. 2018), les modèles de circulation générale (MCG), sont des modèles informatiques qui représentent mathématiquement les processus physiques dans l'atmosphère, les océans, la cryosphère et la surface terrestre (voire Figure.6), ils sont les outils les plus avancés actuellement disponibles pour simuler la réponse du système climatique mondial à des concentrations croissantes des GES. Les MCG représentent le climat à l'aide d'une grille tridimensionnelle au-dessus du globe avec une résolution horizontale comprise entre 250 et 600 km, 10 à 20 couches verticales dans l'atmosphère et parfois jusqu'à 30 couches dans les océans. Leur résolution est donc assez large par rapport à l'échelle des unités d'exposition nécessaires dans la plupart des études évaluations d'impact (Huang et al. 2012). De plus, de nombreux processus physiques, tels que ceux liés aux nuages, se produisent également à des échelles plus petites et ne peuvent pas être correctement modélisés. Au lieu de cela, leurs propriétés connues doivent être moyennées à plus grande échelle dans une technique connue sous le nom de paramétrage (Chung et al. 2011). Les MCG sont le principal outil pour comprendre

comment le climat mondial pourrait changer à l'avenir, cependant ils ne fournissent pas des données fiables sur des échelles inférieures à 200 km environ (Meehl et al.2007).

5.2 Les modèles de circulation régionale (MCR)

Vu la non adaptation des MCG à la simulation du climat local à cause de leur résolutions avoisinant actuellement les 100 km, voire plus grossières (Ward et al. 2015), alors que les processus hydrologiques se produisent généralement à des échelles plus fines (Kundzewicz et al.2007), en particulier, les MCG ne peuvent pas résoudre les problèmes de circulation atmosphérique conduisant à des événements hydrologiques extrêmes (Christensen et Christensen. 2003). Ajouté à ça, le fonctionnement des MCG à des échelles spatiales aussi vastes, empêche la modélisation explicite des facteurs géographiques locaux tels que la topographie et la distribution des surfaces continentales/ marines et/ou le type de végétation qui influent sur les cycles hydrologiques (Rummukainen, 1997). Afin d'améliorer la qualité des données climatiques simulée d'une région, une approche complémentaire fut développée dans les années quatre-vingts, qui consiste à affiner la résolution dans un modèle qui couvre qu'une partie de la surface terrestre (voire la Figure.8). Ces modèles à aire limitée, désignés communément par les Modèles de Circulation Régionaux (MCR) (Reder, 2020), nécessitent des données à l'extérieur du domaine d'intégration (informations nécessaires aux frontières de la grille de calcul) (Uppala et al. 2005). Ces données peuvent être fournies soit par un MCG, soit par des observations disponibles. Les MCR utilisent les mêmes principes physiques de base que les MCG, mais avec une résolution horizontale de 10 à 30 fois plus élevée (de 50 à 10 km environ) (Hannah. 2015).

5.3 Descente d'échelle (ou Downscaling)

La faible résolution des MCG est souvent inadaptée comme entrée pour les modèles d'impact qui fonctionnent à des échelles locales (Dobo et al. 2015). Ces modèles d'impact sont essentiels à la conception de politiques d'adaptation visant à minimiser les impacts négatifs du CC et à en exploiter les effets positifs. Pour cette raison, les méthodes de réduction d'échelle sont appliquées pour fournir des données climatiques de plus haute résolution que celles de faible résolution fournies par des MCG (Castro et al. 2005).

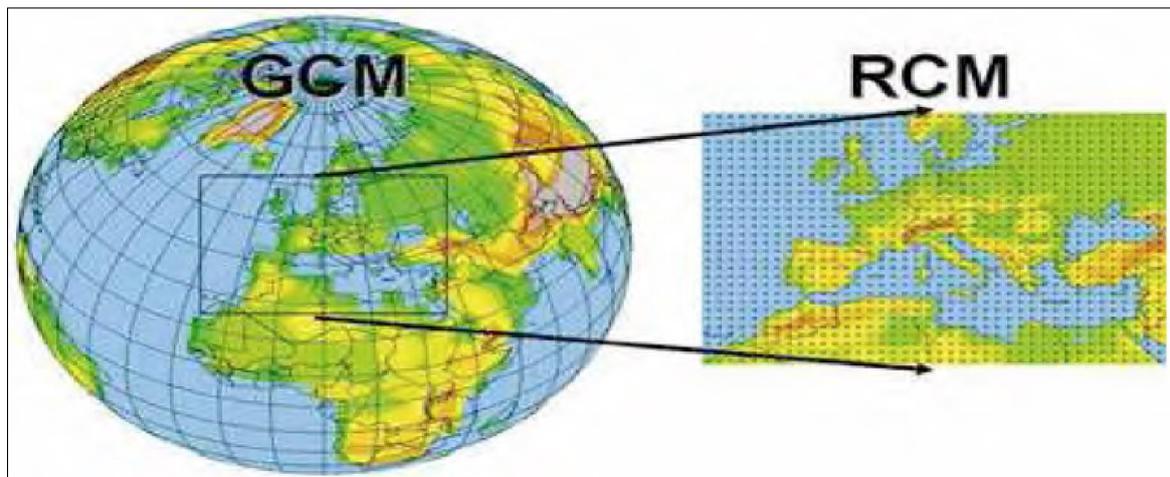


Figure 7. Passage des données climatiques simulées d'échelle globale des GCM (à gauche) vers des données à résolution plus fine des MRC (à droite) par la méthode de réduction d'échelle dynamique (source : O'Sullivan et al. 2016)

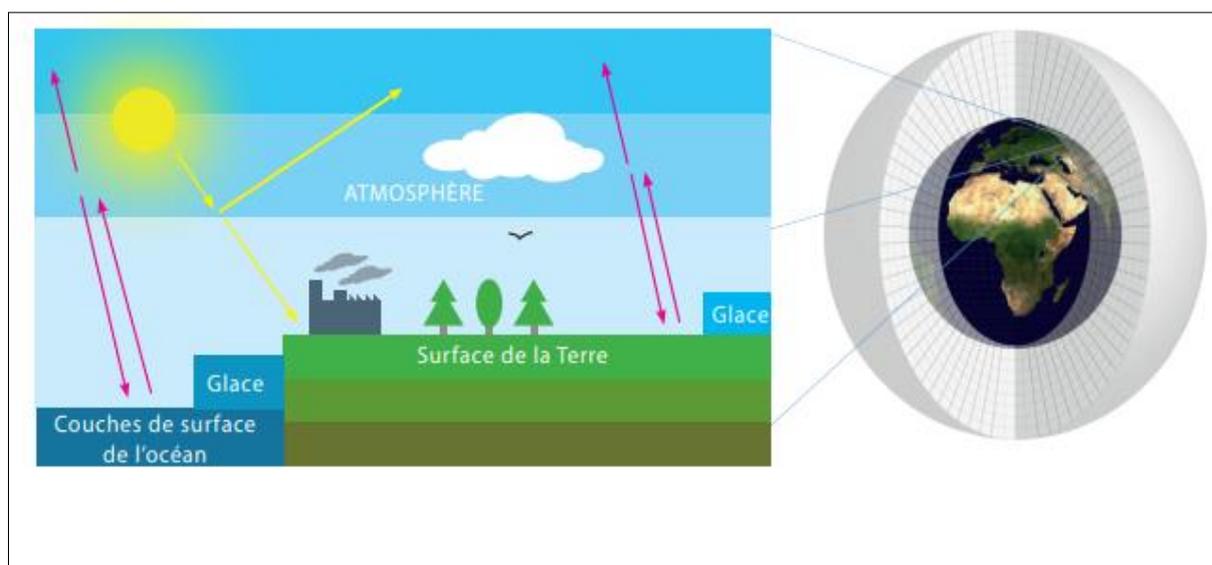


Figure 8. Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite) (Source Charron, 2016)

5.3.1 Types de méthodes de descente d'échelle

Les méthodes de réduction d'échelle sont de deux types, les méthodes statistiques et les méthodes dynamiques.

5.3.1.1 Méthodes de descente d'échelle statistique

L'approche de réduction d'échelle statistique utilise des relations statistiques entre le climat régional et les caractéristiques statistiques des données du MCG (Ayar et al. 2015) et sont regroupées en trois catégories différentes, à savoir pronostic parfait, sortie du modèle statistiques (MOS) et générateurs de temps(WT) (Maraun et al, 2010).

D'après Sachindra et al. (2014), les méthodes de pronostic parfait impliquent l'établissement de relations statistiques entre les variables atmosphériques à grande échelle et les variables hydroclimatiques à l'échelle des bassins versants, à l'aide de techniques de régression ou d'approches de classification météorologique, cependant dans les méthodes MOS, les relations statistiques entre les résultats d'un MCR ou d'un modèle météorologique et les observations d'un paramètre climatique à l'échelle du bassin versant sont utilisées pour améliorer les résultats du modèle.

Selon Hertig et al. (2017), les WT sont des modèles stochastiques qui sont calibrés en fonction des données observées à un endroit spécifique et qui génèrent des séries synthétiques ressemblant aux caractéristiques statistiques observées. L'approche la plus simple utilise une probabilité d'occurrence des précipitations modélisée en chaîne de Markov et une distribution gamma pour les quantités de précipitations (Fowler et al, 2007). Les WT ne représentent généralement pas les extrêmes liés à la longueur des sécheresses persistantes et les vagues de chaleur, car ils ne modélisent que la persistance à court terme. De plus, la variabilité interannuelle et la fréquence des extrêmes sont généralement sous-estimées.

5.3.1.2 Méthodes de descente d'échelle dynamique

L'approche dynamique consiste à régionaliser les résultats du MCG, dans des zones spécifiques de la surface terrestre en combinant les équations primitives associées aux processus de continuité, de mouvement et de thermodynamiques et aux caractéristiques de surface de la région d'intérêt, telles que le taux d'occupation des terres (Le Roux et al. 2017). Cependant, l'approche de réduction d'échelle dynamique est basée sur l'utilisation de la physique complexe des processus atmosphériques et implique des coûts de calcul informatisés élevés, en revanche la réduction d'échelle statistique est moins coûteuse en calcul Sachindra et al. (2014).

5.4 Les scénarios futurs d'émission des GES

Les scénarios d'émissions décrivent des changements futurs plausibles des GES, des aérosols et autres gaz anthropiques dans l'atmosphère sont basés sur un ensemble cohérent d'hypothèses, sur les forces sous jacentes (comme le changement technologique, les tendances futures de demande en énergie, la croissance démographique et le développement socioéconomique, modifications de l'occupation des terres et comportement du système climatique sur une longue période) (Houghton et al. 2001 ; Charron.2016). Ainsi les modèles climatiques projettent le climat futur en fonction des différents scénarios d'émissions des GES, chacun reposant sur ces hypothèses (Shaka, 2008).

Selon Charron. (2016), parmi les nombreux facteurs qui influencent les émissions mondiales futures, les politiques d'atténuation peuvent jouer un rôle primordial dans la régulation des émissions anthropiques, par conséquent, les taux d'émissions futures sont incertains, cela implique que les scénarios fournissent des visions alternatives de la façon dont l'avenir pourrait se dérouler. La gamme des différents scénarios d'émissions est le résultat de la conception et la connaissance actuelle des développements socioéconomiques et technologiques futurs qui peuvent ou non se produire dans le futur, ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances au sujet des hypothèses sous-jacentes, exige la révision des scénarios d'émissions par la communauté scientifique.

Partant du principe de CC causé par des activités humaines, le GIEC a créé un certain nombre de scénarios d'émission. Ils ont pour objet d'obtenir une représentation simple mais possible du monde futur sur différents aspects. Ils sont basés sur des hypothèses d'évolution des "forces motrices" déterminant les émissions de GES. Ils fournissent également les émissions futures de ces gaz. Ils servent ensuite d'entrée à des modèles et permettent ainsi d'obtenir des projections liées aux émissions de GES dans différents domaines et en particulier au niveau climatique.

5.4.1 Les scénarios SA90 et IS92 (période 1990- 2000)

Les scénarios d'émissions du GIEC quantifiant les émissions GES dans le monde jusqu'en 2100, ces scénarios ont considérablement changé depuis la publication de premier rapport du GIEC en 1990, où des scénarios d'émission de type SA90 sont utilisés dans les modèles climatiques pour simuler le climat future. Six autres scénarios du GIEC (IS92a à f) ont été ensuite publiés dans le rapport d'évaluation complémentaire de 1992 du GIEC (Leggett et al. 1992). Ces scénarios comportaient un large éventail d'hypothèses ayant une incidence sur la manière dont les émissions des GES pourraient évoluer, en l'absence de politiques climatiques autres que celles déjà adoptées. Selon Pepper et al. (1992). IS92a a été largement adopté comme scénario standard à utiliser dans les évaluations d'impact. La recommandation était que les six scénarios d'émission IS92 soient utilisés pour représenter la plage d'incertitude des émissions. Les émissions de GES

les plus élevées résultent du scénario IS92e, qui associe, entre autres hypothèses, une croissance démographique modérée, une croissance économique élevée, une disponibilité élevée de combustibles fossiles et un éventuel abandon progressif de l'énergie nucléaire. À l'autre extrême, l'IS92c a une trajectoire d'émission de CO₂ qui finit par tomber sous son niveau de départ de 1990. Cela suppose que la population augmente d'abord, puis diminue vers le milieu du siècle prochain, que la croissance économique est faible et que l'approvisionnement en combustibles fossiles est soumis à de graves contraintes.

5.4.2 Les scénarios SRES (Période 2000-2012)

Avec l'accélération des CC observés et l'augmentation de la concentration des GES, le GIEC en 2000, a développé d'autres scénarios d'émission plus adaptés : les scénarios SRES. Dans le rapport spécial des scénarios d'émission « Special Reports on Emission Scenarios » (Nakicenovic et Swart. 2000), les scénarios futurs ont été regroupés en quatre grandes familles, en se basant sur trois hypothèses principales: l'évolution démographique, le développement économique et social et le degré du développement technologique, ainsi que son orientation (utilisation des énergies renouvelables). Ces quatre familles de scénarios sont organisées et hiérarchisées, depuis ceux susceptibles de produire un haut forçage anthropique, en raison de la forte utilisation de l'énergie combustible fossile, jusqu'à ceux à faible forçage, à cause de la réduction de la consommation et de l'introduction de nouvelles technologies plus efficaces.

Les quatre familles de scénarios SRES peuvent être décrites en résumé comme suit:

La famille de scénarios A1 : décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite, et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant.

La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique:

- Forte intensité de combustibles fossiles (A1FI),
- Sources d'énergie autres que fossiles (A1T),
- Equilibre entre les sources (A1B) (« équilibre » signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies d'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

La famille de scénarios A2 : décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

La famille de scénarios B1 : décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

La famille de scénarios B2 : décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

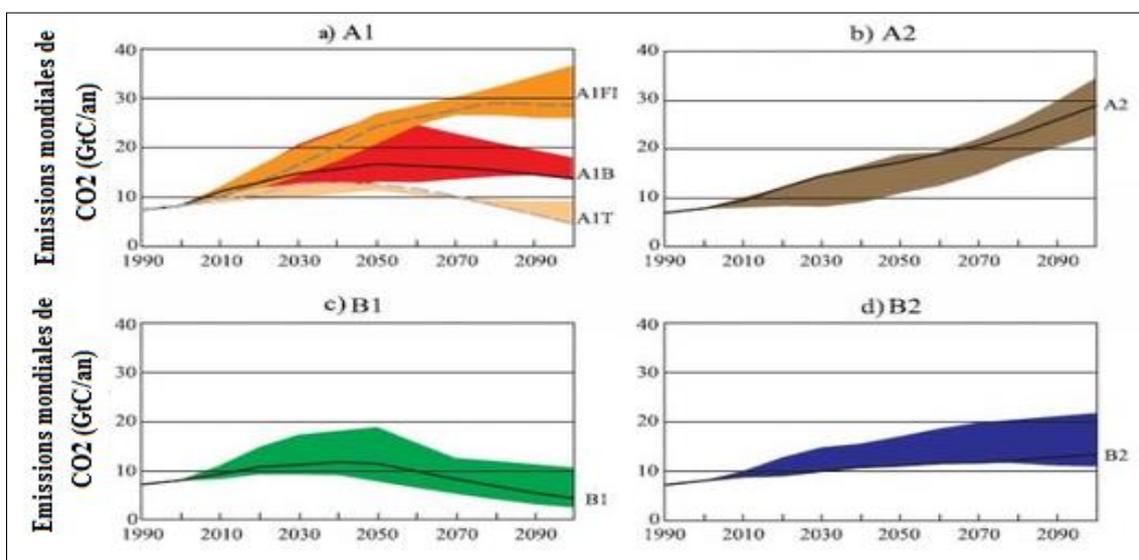


Figure 9. Les émissions de CO₂ dans les groupes de scénarios SRES (Source: GIEC. 2000)

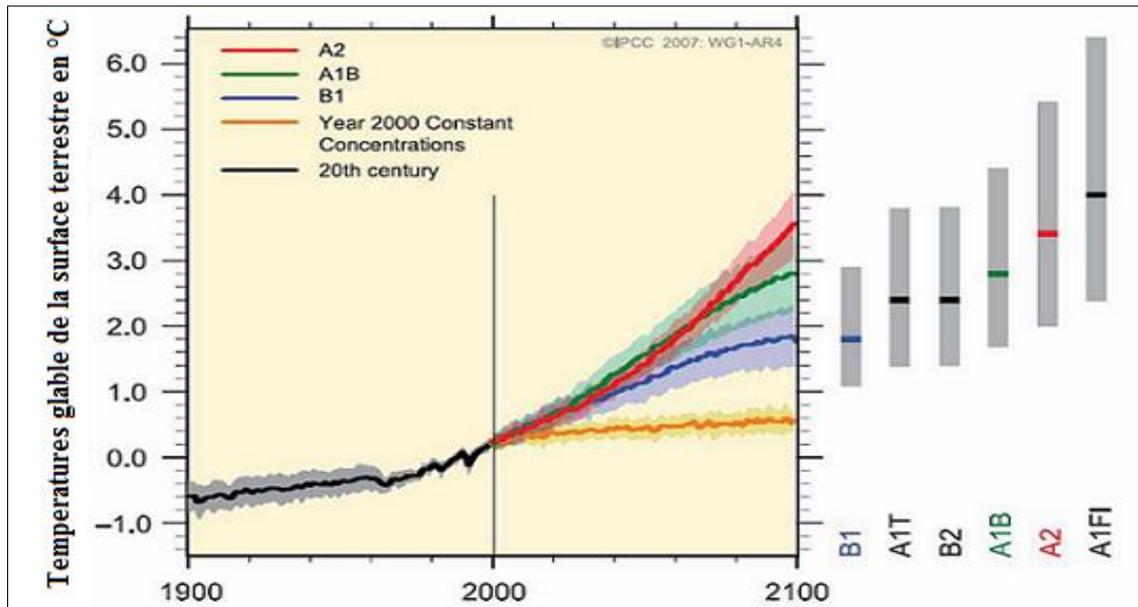


Figure 10. Températures globale de la surface de la terre selon les scénarios SRES durant la période 1990- 2100 (source: GIEC, 2000)

5.4.3 Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway)

Depuis les années 2000, l'évolution des déterminants socio-économiques et la connaissance du système climatique s'est accélérée, par conséquent une mise à jour des scénarios SRES utilisés par le GIEC par une autre famille de scénarios d'émission des GES, connue sous le nom des scénarios RCP «Representative Concentration Pathway», était nécessaire vu que dans les scénarios précédents (SRES), les projections démographiques de la population mondiale ont été revues à la baisse (de 14 milliards d'humains à 10 milliards à l'horizon 2100), le développement des pays émergents a été sous-estimé, et que l'adoption des politiques climatiques à l'échelle globale a vu le jour ces quinze dernières années, donc il fallu intégrer les effets de ces politiques sur la réduction des émissions (ce que les scénarios précédents n'ont pas pris en considération) (GIEC, 2011). Ces scénarios RCP constituaient la base du (RE5) publié en 2013 par le GIEC.

Selon (Moss et al. 2010), contrairement aux scénarios SRES, ces scénarios RCP ne seront pas créés par le GIEC lui-même, mais ils sont établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC. Au-delà de la conception de ces nouveaux scénarios, la communauté scientifique a opéré un véritable virage méthodologique. Alors que la précédente génération de scénarios SRES s'appuyait sur une approche séquentielle, la nouvelle méthode applique désormais une approche en parallèle, car à partir de ces scénarios de référence, les équipes travaillent simultanément : les socio-économistes élaborent des scénarios d'émission suivant des scénarios de développement socioéconomique et technologique qu'ils comparent aux scénarios

climatiques tandis que les climatologues produisent des projections climatiques en utilisant les données d'émissions RCP comme entrée (Figure.11).

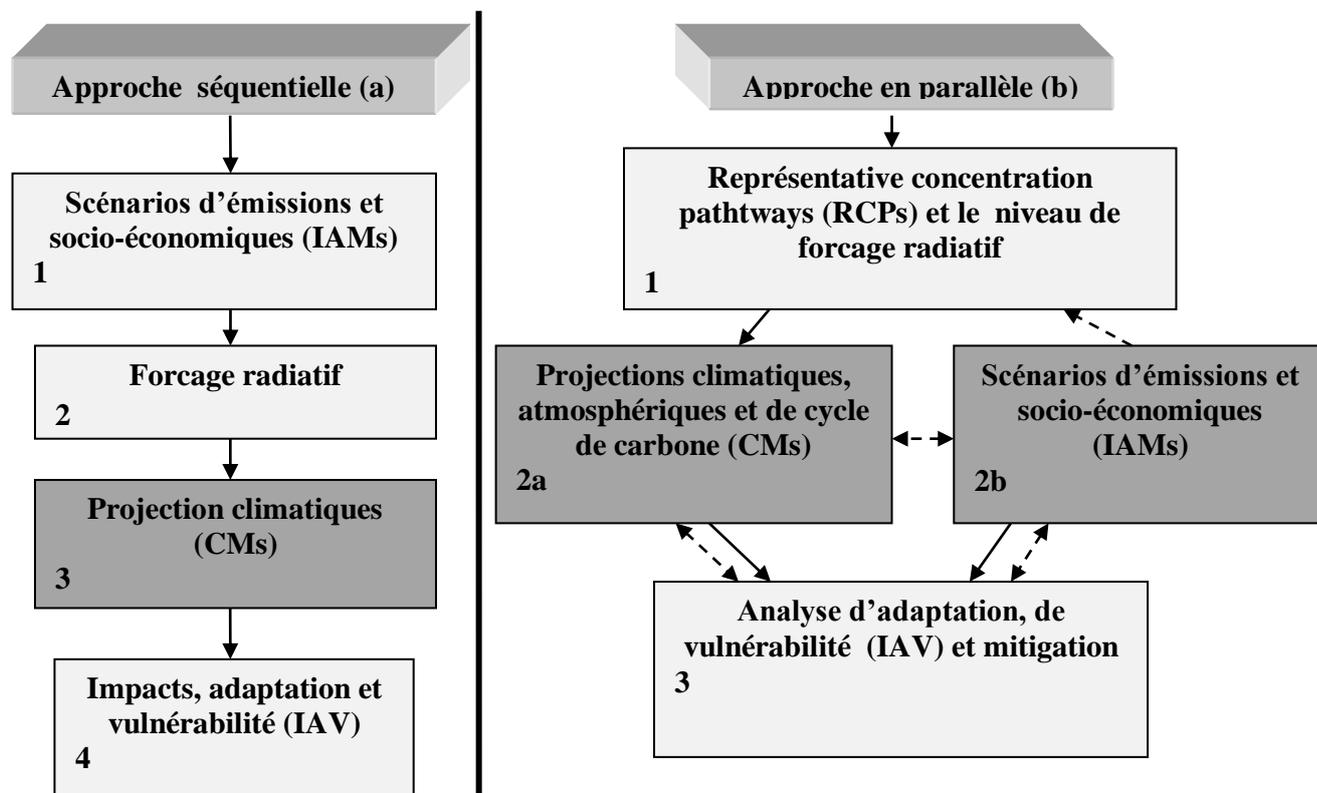


Figure 11. Approches de l'élaboration des scénarios de CC: a) approche séquentielle; (b) parallèle. Les nombres indiquent les étapes analytiques (2 a et 2 b se déroulent simultanément). Les flèches continues indiquent les transferts d'informations, les flèches en pointillés indiquent la sélection des RCP et intégration des informations et des rétroactions (Source : Moss et al., 2008)

Les scientifiques ont ainsi défini quatre familles RCP et nommées en fonction de leur forçage radiatif total (en W/m^2) autour de 2100 (Voire Tableau.1 et Figure.13). Elles vont du RCP2.6, qui suppose une baisse éventuelle des $[CO_2]$ dans l'atmosphère au 21ème siècle et prévoit les changements les plus minimes des températures de surface mondiales, au RCP 8.5, qui repose sur des $[CO_2]$ en augmentation constante, conduisant aux plus hautes variations projetées des températures de surface d'ici 2100 et au-delà (Figure.12 et Tableau.1)

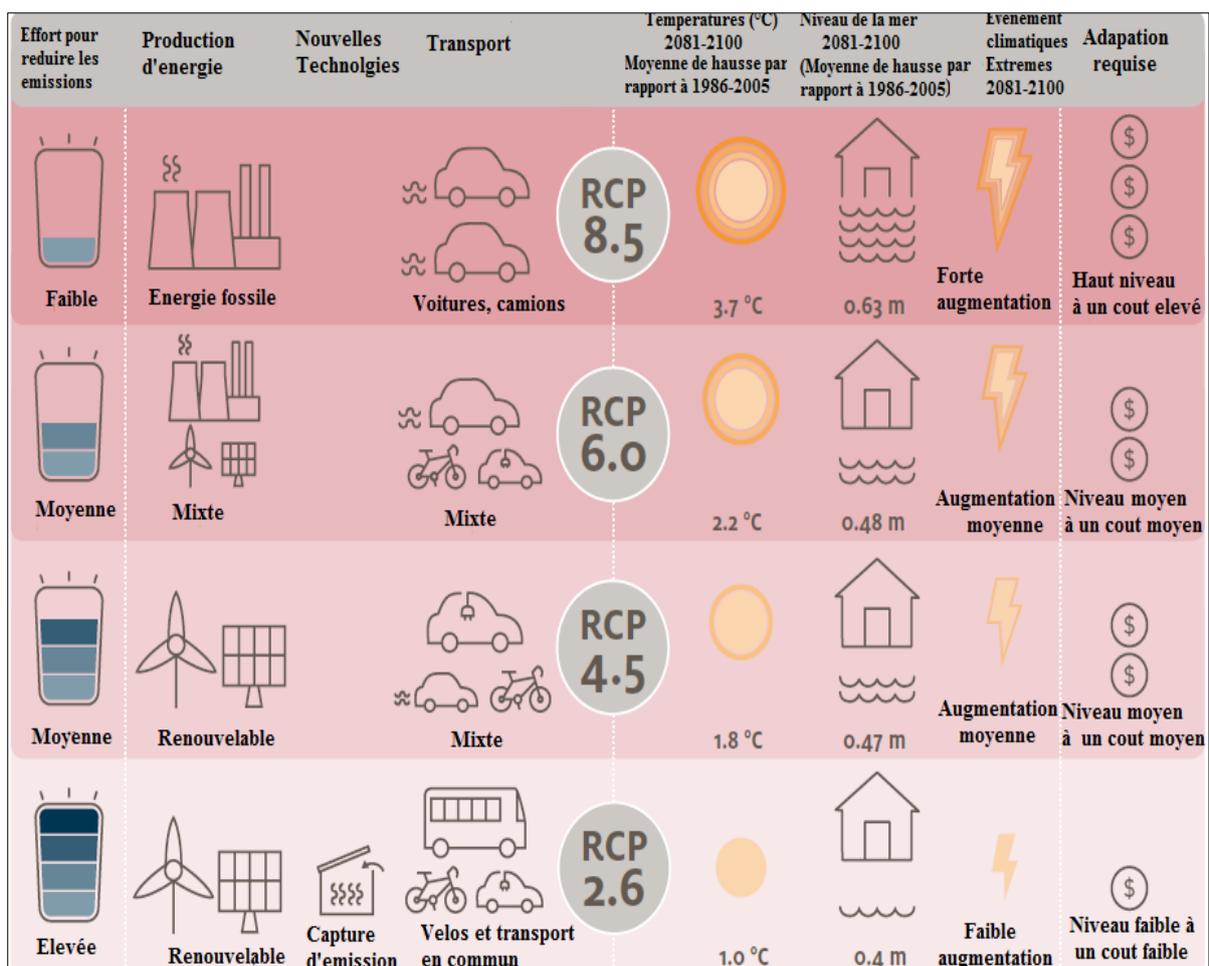


Figure 12. Principales caractéristiques des scénarios RCP (Source : www.coastadapt.com.au)

Tableau 1. Caractéristiques principales des scénarios RCP et similitudes avec les scénarios SRES

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Anomalie de T (°C)	Trajectoire	SRES équivalent (anomalies de T)
RCP 8.5	8.5 W/m ²	> 1370	4.9	Croissante	SRES A1F1
RCP 6.0	6 W/m ²	~ 850	3	Stabilisation sans dépassement	SRES B2
RCP 4.5	4.5 W/m ²	~ 650	2.4	Stabilisation sans dépassement	SRES B1
RCP 2.6	Pic à 3 W/m ² en 2050 puis déclin à 2.6 W/m ² avant 2100	~ 490	1.5	Pic puis déclin	Aucun

La comparaison des scénarios RCP aux scénarios SRES (Figure.13), indique que le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100.

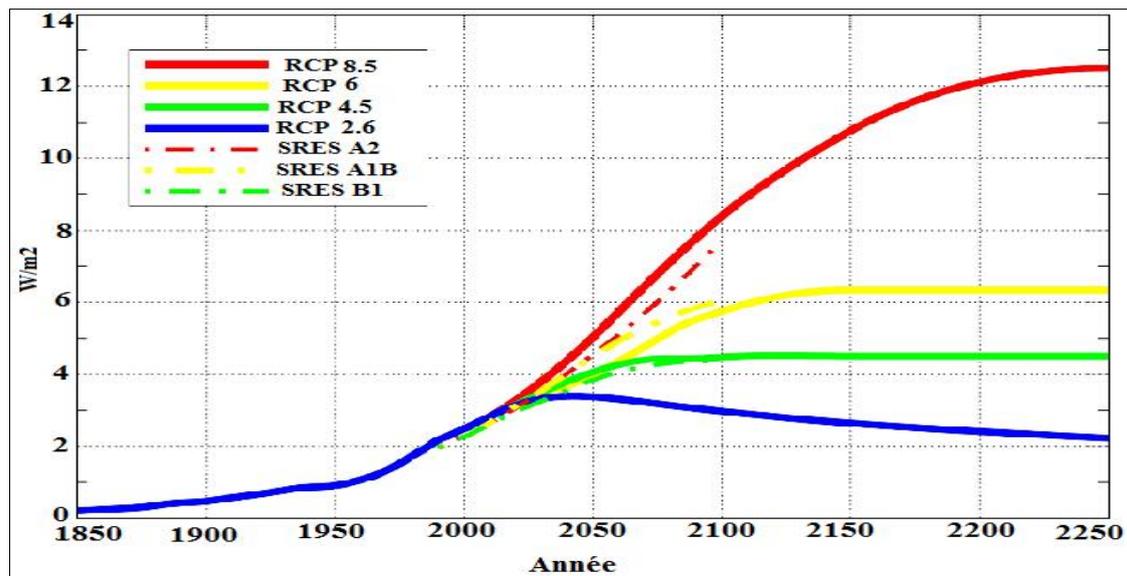


Figure 13. Les quatre scénarios RCP, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les SRES (Source : GIEC.(2011))

6. Les projections climatiques futures selon les scénarios RCP

L'évolution future du climat sera fonction de l'inertie du réchauffement dû aux émissions anthropiques passées, ainsi que des émissions anthropiques à venir et de la variabilité naturelle du climat (GIEC. 2014).

6.1 A l'échelle de globe

6.1.1 Température

Selon GIEC (2014), le changement de la température moyenne à la surface du globe pour la période 2016–2035 relativement à 1986–2005, similaire pour les quatre scénarios RCP, sera probablement compris entre 0.3 °C et 0.7 °C (degré de confiance moyen) (Figure.14).

Cette conclusion est basée sur l'hypothèse qu'aucune éruption volcanique intense, ou changement dans les sources naturelles de CH₄, N₂O... etc. ou aucun changement imprévu du rayonnement solaire n'aura lieu. Vers la fin du XXI^e siècle (2081–2100), le réchauffement moyen à la surface du globe relatif à la période 1986–2005, aura atteint probablement entre 0.3 °C et 1.7 °C selon le

RCP 2.6 (Figure.15), entre 1.1 °C et 2.6 °C selon le RCP 4.5, entre 1.4 °C et 3.1 °C selon le RCP 6.0 et entre 2.6°C et 4.8°C selon le RCP 8.5 (Figure.15). Le réchauffement sur l'Arctique est continu et plus rapide que le reste du globe. Il est quasiment certain qu'aux échelles journalière et saisonnière dans la plupart des régions continentales, les extrêmes chauds seront plus nombreux que les extrêmes froids, à mesure que la température moyenne à la surface du globe augmentera. Il est très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et dureront plus longtemps. Toutefois, des extrêmes froids pourront continuer de se produire occasionnellement en hiver.

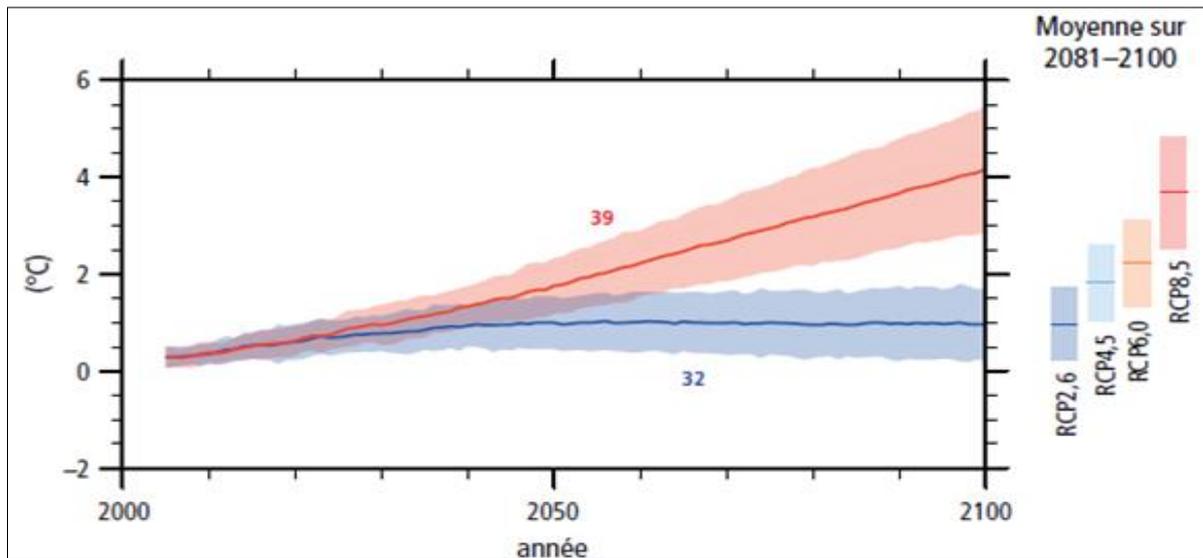


Figure 14. Évolution de la température moyenne à la surface de globe en 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (source : GIEC. 2014)

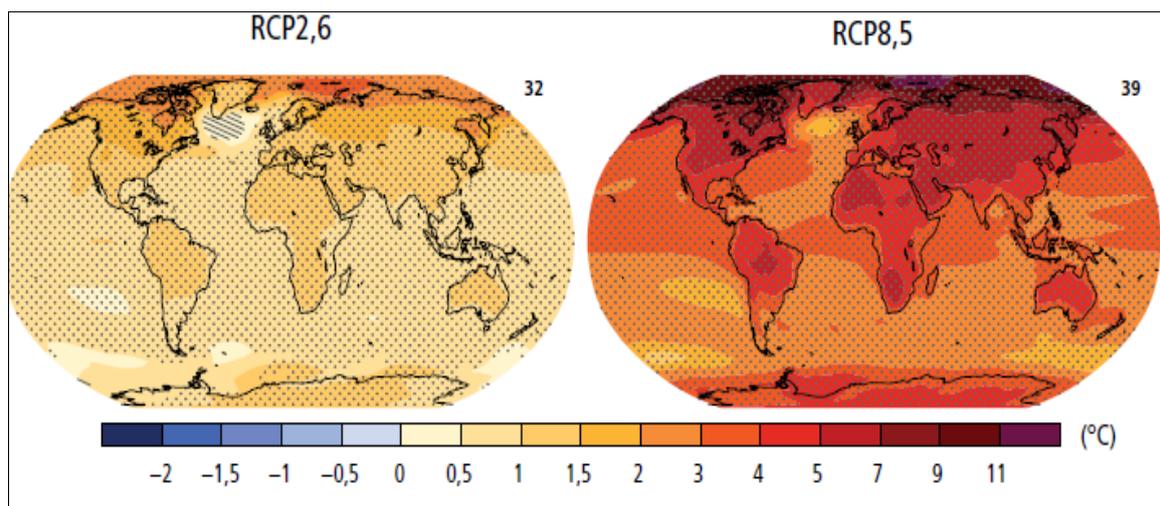


Figure 15. Changements prévus dans les températures moyennes en 2081-2100 à la surface de globe par rapport à la période 1986-2005 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 (source : GIEC. 2014)

6.1.2 Les précipitations

Selon le GIEC. (2014), les changements prévus pour les précipitations ne seront pas réguliers sur le globe terrestre. La moyenne annuelle des précipitations augmentera probablement dans les hautes latitudes et l'océan Pacifique équatorial dans le cas du RCP 8.5. Dans de nombreuses régions des latitudes moyennes et dans les régions subtropicales arides, les précipitations moyennes diminuent probablement, tandis que dans de nombreuses régions humides des latitudes moyennes, elles augmenteront probablement dans le cas du RCP 8.5. Les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur une grande partie des continents des latitudes moyennes et dans les régions tropicales humides (Figure.16).

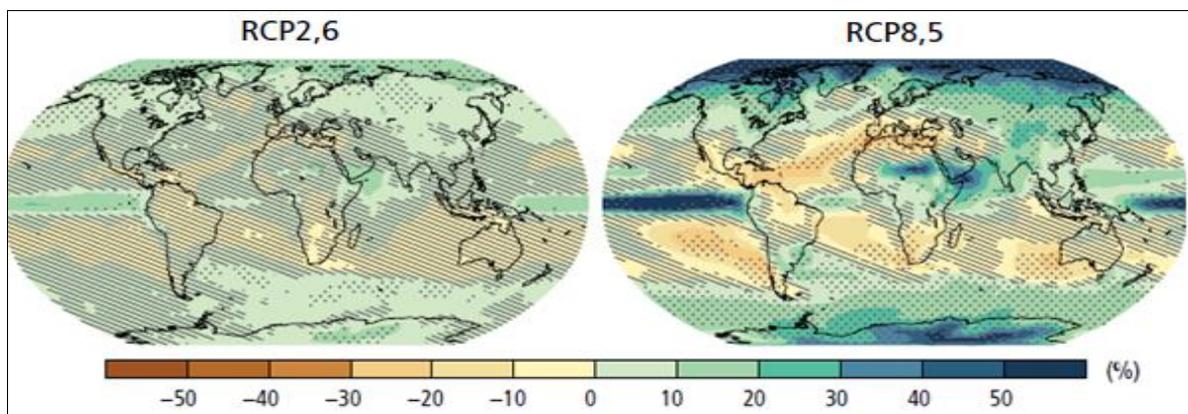


Figure 16. Changements prévus dans les précipitations (%) en 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (source : GIEC. 2014)

6.2 A l'échelle de l'Algérie

En se basant sur les projections climatiques jusqu'à l'horizon 2100 du 20 modèles du CMIP5 sous le RCP 8.5 (fortes émissions) et sous RCP 2.6 (faibles émissions), OMS (2015), a établi les quatre graphes (a, b, c et d) de la Figure.17 qui représentent les projections pour l'an 2100, sous les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, des températures moyennes annuelles, de nombre de jours de vagues de chaleurs, de nombre de jours avec les pluies extrêmes (qui présentent le risque d'inondation) et les projections de nombre de jours secs consécutifs (sécheresse).

6.2.1 Températures

Le graphe de la Figure.17.a, présente l'évolution des températures moyennes annuelles durant la période 1900-2100 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 pour l'Algérie, les anomalies de température sont ajoutées à la moyenne historique et lissées, ainsi sous RCP 8.5, la température annuelle moyenne devrait augmenter d'environ 6.2°C en moyenne de 1990 à 2100 alors que sous RCP 2.6 dont les émissions diminuent rapidement, la hausse de la température est limitée à environ 1.7°C.

6.2.2 Vagues de chaleur

La Figure.17.b présente l'évolution de nombre de jours de vagues de chaleur durant la période 1900-2100 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 pour l'Algérie, le nombre de jours de vagues de chaleur devrait passer d'environ 10 jours en 1990 à environ 215 jours en moyenne en 2100 sous RCP 8.5, si les émissions diminuent rapidement sous RCP 2.6, le nombre de jours de vagues de chaleur chaudes seront limités à environ 55 jours en moyenne.

6.2.3 Pluies extrêmes avec risque d'inondations

La Figure.17.c, présente l'évolution de nombre de jours de pluies extrêmes présentant le risque d'inondation durant la période 1900-2100 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 pour l'Algérie, sous le scénario d'émissions élevées RCP 8.5, le nombre de jours de fortes précipitations (20 mm ou plus), pourrait augmenter d'environ 2 jours en moyenne entre 1990 et 2100, ce qui impliquerait une légère augmentation du risque d'inondation. Le nombre de ces jours reste cependant faible si les émissions diminuent rapidement sous RCP 2.6, son augmentation globale est faible, même si la variabilité interannuelle reste élevée. Additivement à ça, il est indiqué dans le bulletin de l'OMS, (2015), que sous RCP 8.5, sans investissements importants en adaptation, une moyenne annuelle de 61 500 personnes en Algérie, devraient être touchés par les inondations dues à l'élévation du niveau de la mer entre 2070 et 2100. Cependant, si les émissions mondiales diminuent rapidement sous RCP 2.6, et qu'il y aura une intensification majeure de la protection (c'est-à-dire construction/relèvement de digues), la population annuelle affectée pourrait être limitée à moins de 100 personnes.

6.2.4 Jours secs consécutifs «sécheresse»

La Figure.14.d présente l'évolution de nombre de jours sec (jour de sécheresse) durant la période 1900-2100 sous RCP 2.6 et RCP 8.5 pour l'Algérie. Dans le scénario de fortes émissions RCP 8.5, la plus longue période de sécheresse pourrait augmenter d'environ de 12 jours en moyenne en 2100, par rapport à environ 85 jours en 1990, ce qui laisse supposer une persistance légèrement plus grande des sécheresses, avec une grande variabilité de la persistance d'une année à l'autre. Si les émissions diminuent rapidement sous RCP 2.6, l'augmentation est limitée à environ 5 jours en moyenne.

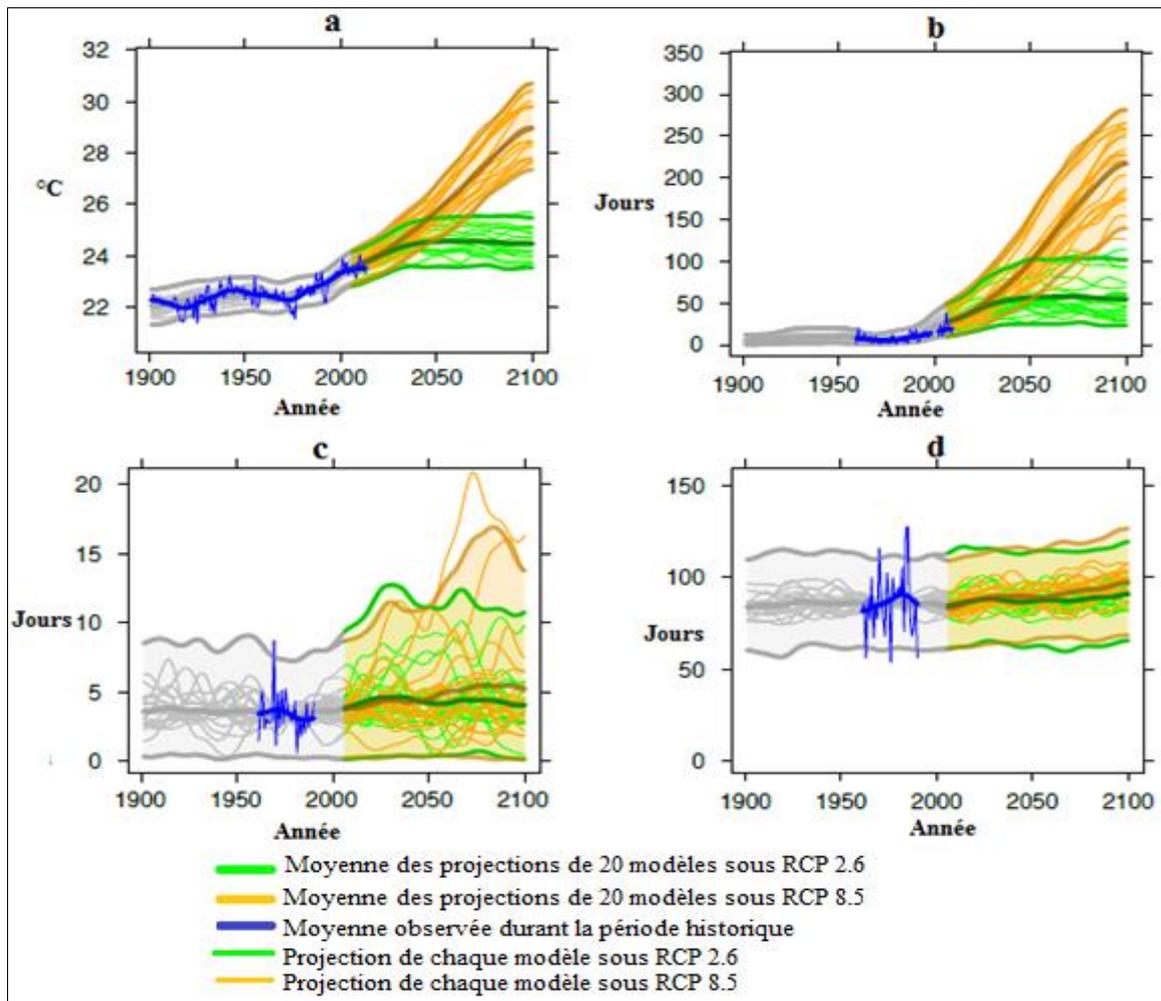


Figure 17. Évolution durant la période 1900-2100, sous les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 : des températures moyennes annuelles (a), de nombre de jours de vagues de chaleurs (b) de nombre de jours avec les pluies extrêmes qui présentent le risque d'inondations (c) et les projections de nombre de jours secs consécutifs (sécheresse) (d) (source : OMS.2015)

7. Les incertitudes dans les projections climatiques

L'incertitude est un problème important inévitable à toute projection du CC (Arnell et al. 2004). En gros, l'incertitude dans les projections climatiques provient de trois sources: l'incertitude concernant le forçage climatique futur, la réaction du système climatique à ce forçage (changement de climat) et la réalisation effective du climat à une période donnée, qui est soumise à des contraintes internes telle que la variabilité (Shepherd, 2019). La comparaison de la moyenne des simulations climatiques à celle observée, sur une période donnée et un espace donné et pour un paramètre climatiques donné, révèle qu'elles sont assez en bon accord, cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement, il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certaines valeurs extrêmes sont assez mal reproduites, à cause des différents types d'incertitude citées ci-dessus (Terray et al., 2012).

7.1. Méthodes de correction des données climatiques simulées

Dequé (2007), a désigné les sorties des modèles correspondant à la période de référence et à celle de la période future par (R) et (S) respectivement, selon cet auteur, les sorties (S) des scénarios futurs des RCM doivent subir un post traitement par rapport aux observations réelles (O), pour aboutir à de nouvelles données simulées corrigées qui devraient être dépourvues des biais provoqués par les incertitudes citées auparavant, ces nouvelles données corrigées sont désignées par (R* et S*) pouvant être utilisées dans les études d'impact du CC. Il a ensuite supposé que le post-traitement est effectué à l'échelle journalière c'est-à-dire que les sorties de modèle sont des séries de données météorologiques journalières, de température, de précipitations,... etc notées R(j) et S(j). Soit O(j) une série équivalente de données observées, et soit \bar{R}_j, \bar{S}_j les moyennes pluriannuelles des R et S. Ainsi cinq familles de méthodes de correction des sorties des modèles qui peuvent être utilisées dans l'évaluation d'impact.

- La méthode de confiance : $R^*(j) = R(j)$ et $S^*(j) = S(j)$, cette méthode n'exige aucune correction aux sorties brutes de RCM, elle est applicable si les sorties du modèle sont assez linéaires.

La méthode dite « delta ou des anomalies » : est très favorisée vu sa simplicité. Pour chaque variable climatique, des perturbations sont calculées mensuellement comme le rapport pour tous les paramètres climatiques et/ou la différence dans le cas de la température, entre le climat mensuel moyen simulé sous CC et climat simulé pour le temps actuel pris comme référence. Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément pour tout le mois considéré :

$R^*(j) = O(j)$ et $S^*(j) = O(j) \times (\bar{R}_j / \bar{S}_j)$ ou $[(\bar{R}_j - \bar{S}_j)]$. Cette approche ne rend compte que du changement de climat moyen. Sa limitation principale est donc qu'elle ne permet pas de rendre compte des changements possibles de la fonction de distribution des variables climatiques à l'échelle journalière. Elle ne considère pas non plus les modifications éventuelles de la variabilité interannuelle. Cette méthode est appliquée par exemple par Gago-Silva et al. (2012), comme elle est développée ultérieurement ici sur cette thèse dans le chapitre Matériel et Méthodes.

- **La méthode de débiaisage** : cette méthode corrige l'erreur moyenne mais suppose que la variabilité du RCM est bonne : $R^*(j) = R(j) + (\bar{O} - \bar{R})$ et $S^*(j) = S(j) + (\bar{O} - \bar{R})$. L'avantage par rapport à la méthode des deltas est que cette méthode permet facilement d'avoir la variabilité climatique à l'échelle journalière dans certaines régions (Casanueva et al. 2019).

- **La méthode de correction de variables ou méthode Quantile-Quantile (Q-Q):**

$R^*(j) = f(R(j)/O)$ et $S^*(j) = f(S(j)/O)$, avec f une fonction construite avec les données observées « O ». Cette méthode généralise la précédente et recouvre plusieurs techniques (régression, décomposition des valeurs singulières...). Dans la méthode de débiaisage, f est prise égale à x-y

avec x la donnée à corriger et y le biais (R-O). (Eg. Cette méthode est appliquée par Bennett et al. (2011) en Australie pour corriger les données simulées des pluies et d'évapotranspiration pour la période 1961-2100, leur travail a montré l'efficacité de cette méthode pour corriger ces données vu qu'elle aboutit à simuler correctement par des modèles hydrologiques les débits des rivières observés durant la période de référence 1961-2007.

- **La méthode des types de temps ou TT** : $R^*(j) = O(j_1)$ et $S^*(j) = O(j_2)$, où j_1 et j_2 sont des dates proprement choisies dans la série d'observation. Cette méthode regroupe des techniques analogues. La limite de cette méthode est qu'elle peut changer la fréquence des événements météorologiques sans pouvoir produire des événements jamais enregistrés, ce qui ne convient pas par exemple aux températures extrêmes estivales. Il a été utilisé par exemple dans Martin et al. (1997) pour la couverture de neige sur les Alpes.

Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse des résultats des différentes études faites à l'échelle mondiale et en Algérie, montre que le changement climatique est un fait réel. C'est ainsi qu'il ressort l'importance de la modélisation de climat futur, pour préparer des stratégies d'adaptation des secteurs les plus touchés par les impacts de changement climatique futur, tel que l'agriculture et les ressources en eau, cependant plus d'effort doivent être fournis pour réduire les incertitudes liées aux données simulées, en améliorant la précision des modèles climatiques par une meilleure compréhension de système climatique terrestre et ses différentes interactions naturelles internes.

Chapitre II : Modélisation de l'impact du changement climatique sur les cultures**1. Introduction**

La réalisation et le maintien de la sécurité alimentaire mondiale sont mis au défi par les changements de population, de revenus et de climat, entre autres facteurs. Évaluer ces menaces et peser les solutions possibles nécessite une approche multidisciplinaire robuste. L'une de ces approches intègre la modélisation biophysique à la modélisation économique pour explorer les effets combinés des stress climatiques et des futures tendances socio-économiques, fournissant ainsi une image plus précise de la manière dont l'agriculture et le système alimentaire pourraient être affectés dans les décennies à venir. Avant d'aller vers la modélisation de l'impact de CC, en associant les modèles climatiques aux modèles de cultures, une compréhension préalable, des impacts de changement de chaque paramètre climatique (température, précipitations, insolation, [CO₂],...etc) et de leur effets combinés, est indispensable pour interpréter les résultats des simulations établies par les modèles de cultures dans des scénarios de CC. Ainsi, ce chapitre donne un bref rappel de la littérature faite sur les impacts de la variabilité de ces paramètres climatiques sur la production des cultures à travers le monde. Ensuite, il aborde la modélisation des cultures en définissant les principales approches utilisées pour la conception des modèles de culture et leurs différentes utilisations dans l'agriculture.

2. Impact de changement climatique sur la productivité des cultures

Le CC a considérablement affecté l'agriculture mondiale au 21^{ème} siècle (Ochieng et al., 2016). Au départ les études d'impacts du CC sur les cultures sont axées sur les effets de la hausse des [CO₂] (Curry et al., 1990), mais plus tard, il a été rapporté que les changements de température, de rayonnement solaire et des précipitations,... etc. doivent être étudiés pour évaluer les impacts du CC, au-delà de l'augmentation des [CO₂], sur les cultures (Pielke et al., 2002). Chaque facteur climatique a une gamme d'intensité optimale, qui diffère selon les espèces et même selon les stades de croissance au sein des mêmes espèces. Au-delà des limites de l'intensité optimale de facteur climatique, le développement de la plante est pénalisé, soit par un excès, soit par une intensité déficiente de la variable climatique impliquée. Par conséquent, le stress climatique peut provoquer des changements ou un ralentissement des fonctions physiques, chimiques, structurelles et métaboliques qui reviennent à la normale lorsque ce stress cesse (Anonyme, 1992). Il existe un besoin actuel clair de synthétiser les données sur le rendement des cultures et le climat, provenant de différentes régions avec des informations plus détaillées, pour prédire les impacts de l'évolution de climat sur la production alimentaire future (Lobell, 2003).

Le développement, la croissance et les rendements des cultures céréalières réagiront grandement à l'augmentation du [CO₂] atmosphérique, températures élevées, précipitations irrégulières et rayonnement solaire, augmentation de la fréquence de températures et précipitations extrêmes (Tubiello et al., 2007 a ; Yu et al., 2013). En conséquence, il est essentiel de comprendre l'effet des facteurs climatiques qui déterminent le rendement pour prévoir la production agricole régionale, choisir de nouveaux cultivars, améliorer les techniques de gestion des cultures et adopter des stratégies réalisables pour faire face aux CC (Yu et al., 2013). Selon Wang (2017), il est difficile de séparer l'impact des CC sur les rendements des cultures céréalières de l'impact des autres facteurs tels que le changement de l'utilisation des terres, le choix des cultivars et de la gestion des cultures (fertilisation, irrigation.. etc.), cependant l'utilisation du modèle de simulation des cultures a permis d'étudier séparément l'impact des CC sur les rendements des cultures tout en conservant d'autres variables technologiques (comme les cultivars et la gestion) constantes.

2.1 Impact de changement des températures sur les cultures

Il est prévu une augmentation de la température moyenne du globe et celle des régimes régionaux résultant de l'augmentation des concentrations atmosphériques des GES, ce qui aura des conséquences importantes sur le rendement des cultures (Tao et al., 2006) ; Lobell et al., 2007; Luo., 2011). En général, la photosynthèse chez les plantes C3 est plus sensible aux températures plus élevées par rapport aux cultures C4 (Lipiec et al., 2013). Avec des températures moyennes plus élevées, les plantes achèvent également leur cycle de croissance plus rapidement (Hatfield et al., 2011). A titre d'exemple, dans le sud de l'Espagne, Garcia-Mozo et al. (2010), ont déduit une avancée des dates des stades phénologiques (floraison, foliation et maturité des fruits) et particulièrement la date de floraison chez des espèces arboricoles et herbacées, qui est due à l'augmentation de la température moyenne, durant la période 1986-2008, cependant cette avancée est plus marquée chez les espèces arboricoles que chez les herbacées. Lobell et Field (2007) ont montré que les rendements des cultures (blé, riz, maïs, orge, soja, sorgho) diminuent globalement de - 0,6 à - 8,9 % avec une hausse de la température de 1°C. Autrement, Wardlaw et Wrigley (1994), ont rapporté que les rendements céréaliers en Australie et aux États-Unis, ont diminué annuellement de - 10% et - 15% respectivement, en raison de températures élevées pendant l'anthèse et le remplissage du grain.

Avec le réchauffement, les cultures ont moins de temps pour se reproduire, ainsi les échecs de reproduction sont plus probables, ce qui réduira également les rendements (Craufurd et Wheeler., 2009). Selon Lobell et Fiel (2007), avec une augmentation de + 1°C des températures moyennes, les rendements des principales espèces vivrières et commerciales peuvent diminuer de - 5 à - 10 %, cependant Tao et al. (2006), suggèrent que la tendance au réchauffement continu a eu

des impacts importants sur le développement et la production de grandes cultures, mais l'intensité et l'étendue de ces impacts ont été différentes sur le plan spatial et temporel (Tao et al., 2006).

Les taux de respiration plus élevés dus aux températures plus élevées entraînent une plus grande utilisation de sucres par les plantes. En conséquence, il reste moins de sucre dans le produit récolté, ce qui peut réduire sa valeur marchande (Hatfield et Prueger, 2015). Ces effets deviennent plus graves à mesure que les températures augmentent pendant la phase de remplissage du grain ou de maturation du fruit (Simpson, 2017). Lobell et al. (2003) ont conclu que les changements progressifs de la température ont eu un impact mesurable sur le maïs et le soja en Amérique. Aux Philippines, Peng et al. (2004) ont utilisé une approche modéliste pour établir le lien étroit entre le rendement céréalier du riz et la température minimale, en se basant sur les relevés d'expériences de terrain en continu, réalisées entre 1992 et 2003. Ils ont conclu que les rendements en grains de riz ont diminué de - 10% pour chaque augmentation de + 1°C de la température minimale de la période de croissance pendant la saison sèche, alors que l'effet de la température maximale sur le rendement des cultures était insignifiant. Ils ont prouvé qu'il y a rapport direct entre la diminution des rendements en riz et la hausse de la température nocturne induite par le réchauffement global. De plus, Lobell (2007) a constaté que l'Intervalle de Température Diurne (ITD = $T_{max} - T_{min}$), a relativement une forte incidence négative en Australie et au Canada sur le blé de printemps, tandis qu'elle a un effet positif sur le blé en France.

Les projections futures des rendements des cultures faites avec des modèles de cultures, à l'échelle globale, prévoient de faibles gains de rendements des cultures, dans les régions tempérées, où il est prévu des hausses de la température moyenne locale de + 1 à + 3°C, associée à une augmentation du [CO₂] et des changements des précipitations. En revanche, dans les régions tropicales, les modèles indiquent des impacts négatifs sur le rendement des principales cultures même avec des augmentations de température modérées (+ 1 à + 2°C). Autrement, Cline (2007), suggère que le réchauffement prévu pour la fin du 21ème siècle (2081), a des impacts de plus en plus négatifs dans toutes les régions de globe, cependant la répartition géographique des impacts prévus du CC sur les rendements (réponses moyennes pour le blé, le maïs, le riz et le soja), est différente entre les pays de haute latitude, principalement développés, et de faible latitudes correspondant aux pays en développement tropicaux.

2.2. Impact de changement de régime des pluies sur les cultures

Les ressources en eau jouent un rôle essentiel dans la productivité des cultures, et l'évaluation de la disponibilité saisonnière et à long terme de l'eau n'est pas seulement importante pour le maintien de la vie humaine, de la biodiversité environnementale, mais aussi utile aux agriculteurs pour déterminer la gestion de l'eau agricole (Kang et al., 2009). La disponibilité de l'eau est menacée par les CC en raison de la diminution possible des précipitations dans certaines régions

du monde (Wang et al., 2009 d ; Rowhani et al., 2011 ; Traore et al., 2013). Selon El-Beltagy et Madkour (2012), le changement dans le régime des précipitations est déjà en cours. Les zones humides deviendront probablement plus humides et les zones arides deviendront plus sèches, ce qui accentuera la rareté d'eau dans ces zones arides (Figure.18). Les indicateurs de manque d'eau montrent que la diminution maximale des ressources en eau se produira dans la région WANA (Asie de l'Ouest et Afrique du Nord en anglais). Selon cette même Figure.18, il est indiqué qu'en 2025, les terres arides présenteront 41.3 % de la surface terrestre et que 34.7% de la population va occuper ces terres arides. Beaucoup d'études sont faites pour ressortir l'impact de la diminution des pluies sur les rendements des cultures céréalières, quelques résultats de ces études peuvent être indiqués ici, par exemple, en Jordanie Al-Bakri et al. (2011), en simulant les rendements de blé et de l'orge avec le modèle DSSAT pour la période 1996–2005, sous des scénarios de CC, ont déduit que la diminution des précipitations de - 10 à - 20%, a provoqué une baisse des rendement prévus de - 4 à - 8% pour l'orge et de - 10 à - 20% pour le blé, alors que l'augmentation des précipitations de + 10 à + 20% a augmenté les rendement prévus de + 3 à + 5 % pour l'orge et de + 9 à + 18% pour le blé. Selon Mo et al. (2017), en Chine, les projections climatiques faites par un ensemble de MCG, prévoient qu'en 2050, l'augmentation de la demande en eau des cultures et l'intensification de l'Évapotranspiration (ET), résultant du réchauffement planétaire, réduiront l'excédent des ressources en eau (Précipitations – ET), d'environ - 4% à - 24% et augmenteront de manière significative la demande en eau d'irrigation des cultures, durant leur périodes de croissance. Au Mexique, d'après Murray-Tortarolo et al. (2018), il semble qu'à l'avenir, il est très probable que la pluie diminuera et que les rendements de maïs suivront en conséquence cette tendance. Toutefois, les impacts ne seront pas répartis de manière homogène, ainsi ces auteurs ont conclu que dans les scénarios futurs, il est prévu que les rendements ne changeraient pas ou diminueraient jusqu'à - 10%. Les impacts négatifs de la baisse des pluies les plus importants ont été prédits dans le Nord -Est et le Sud du pays, où les rendements vont diminuer jusqu'à - 30% dans tous les scénarios RCP.

Pour l'Algérie, la seule étude faite sur la projection de l'impact des CC sur les rendements de blé est celle réalisée par Chourgal et al. (2015), ils ont projeté les rendements de blé sous le scénario A1B SRES pour 2071-2100, ils ont déduit que les rendements de blé vont diminuer à Alger, suite à la baisse des cumuls annuels des pluies, cependant pour BBB, la hausse des pluies d'automne, va favoriser les semis précoces qui vont laisser les rendements inchangeables dans le futur.

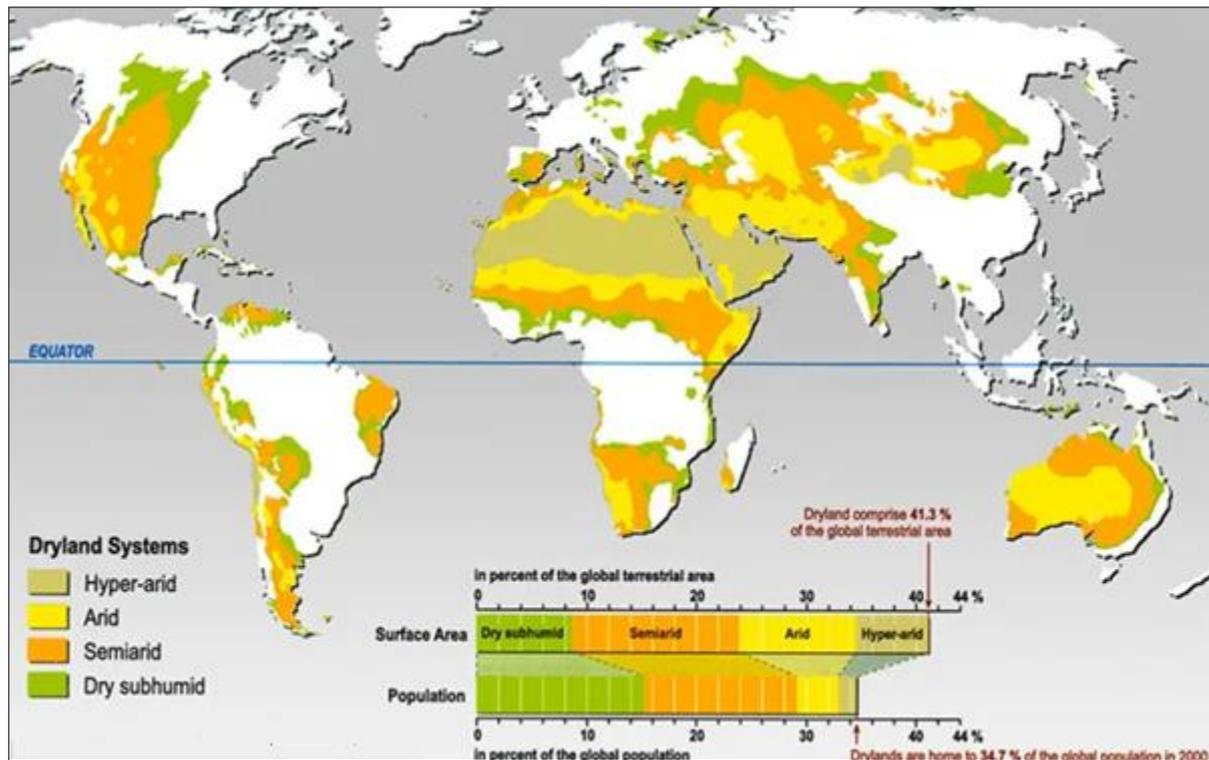


Figure 18. Projection de la rareté de l'eau jusqu'en 2025 dans différentes régions du monde (source : El-Beltagy et Madkour, 2012)

2.3 Impact de changement de rayonnement solaire sur les cultures

La quantité de rayonnement solaire incident a des effets directs sur les processus physiologiques et biophysiques de la végétation, tels que la photosynthèse de la canopée et l'ET, ainsi que le bilan énergétique sur des périodes diurnes/saisonniers (Yang et al., 2013). Le rayonnement solaire global atteignant la surface terrestre a diminué en moyenne de -1.3% par décennie de 1960 à 2000 GIEC. (2007). Ceci est confirmé par de nombreuses études qui ont démontré des changements décennaires significatifs du rayonnement solaire de surface terrestre, observés sur des sites différents répartis dans le monde entier (Wild et al., 2005; Wild, 2009), et en particulier dans toute la Chine depuis 1960 (Che et al., 2007; Kaiser et Qian, 2002). D'autres études (Norris et Wild, 2009; Augustin et Dutton, 2013), rapportent l'amincissement et l'éclaircissement de rayonnement solaire incident, qui sont produits dans différentes régions de globe, et qui sont liés à la charge d'aérosols dans l'atmosphère et leur influence sur la transmittance atmosphérique. Le déclin significatif de rayonnement solaire en Chine, a été attribué à une croissance économique rapide qui a provoqué une augmentation des aérosols dans l'atmosphère (Yang et al., 2013). Le rayonnement solaire est absorbé ou réfléchi dans l'espace par les aérosols et autres particules. Le déclin du rayonnement solaire et la modification de sa composition pourraient avoir des effets importants sur la croissance des plantes, l'ET et l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) qui

pourraient créer des répercussions importantes sur le développement et la croissance des cultures (Stanhill et Cohen, 2001 ; Zhang et al., 2011 a ; Choudhury., 2001; Rodriguez et Sadras., 2007). Yang et al. (2013), ont conclu sur deux sites expérimentaux en Chine, qu'une légère diminution de rayonnement solaire n'a eu aucun effet sur le rendement du blé, mais a amélioré l'efficacité d'utilisation de l'eau, tandis que sous de faibles niveaux de rayonnement, les rendements ont considérablement diminué. Black et al. (2006), ont conclu que les diminutions combinées de rayonnement solaire total et diffus, au cours de la période 1955-1984, en Irlande, n'ont provoqué qu'un faible impact sur la photosynthèse et la production de la biomasse, dans des écosystèmes terrestres tempérés, en revanche, la diminution de la photosynthèse était plus importante dans les systèmes arables et de prairies, où la productivité de la biomasse est limitée par la lumière et particulièrement sensible aux changements de rayonnement total et diffus. Chameides et al. (1999), en se servant de modèle CERES, ont trouvé une corrélation étroite entre la diminution du rayonnement solaire et le rendement de riz en Chine.

2.4 Impact de changement de concentration en CO₂ dans l'atmosphère sur les cultures

L'augmentation des [CO₂] dans l'atmosphère est liée à une forte probabilité de CC, caractérisée par une augmentation de la température de la surface terrestre, par des changements dans les régimes globaux et régionaux des précipitations, et par des changements en terme de moyenne et de variabilité des variables climatiques, qui pourraient affecter les fonctions de l'écosystème et le bien-être humain (Sultan et Gaetan., 2016).

D'après Wang (2017), l'augmentation des [CO₂] et les CC qui y sont associés, peuvent avoir des répercussions importantes sur la production agricole, ce qui a poussé les chercheurs à mener des centaines d'études pour analyser les réponses des cultures à l'augmentation des [CO₂], au-dessus des niveaux actuels. Des [CO₂] élevées dans l'atmosphère stimulent la photosynthèse, ce qui entraîne une augmentation de la productivité des plantes et une modification des cycles de l'eau et des nutriments (Kimball et al., 2001 ; Nowak et al., 2004 ; Leakey 2009). Deryng et al. (2016) suggèrent que l'enrichissement de l'air en CO₂, peut potentiellement augmenter la productivité de l'eau des cultures en améliorant la photosynthèse et en réduisant la transpiration au niveau des feuilles des plantes. Les expériences réalisés dans des conditions optimales montrent que le passage d'une [CO₂] atmosphérique de 350 ppm autre à une autre de 700 ppm augmente la photosynthèse foliaire de + 30 à + 50 % chez les cultures de type C3, notamment le riz, le soja et le blé, et de + 10 à + 25%, chez les cultures C4 comme le maïs et le sorgho, malgré une certaine régulation à la baisse de la photosynthèse foliaire par des [CO₂] élevées chez les plante C4 (Tubiello et al., 2007 b).

Deryng. (2015) a constaté que le rendement moyen simulé des cultures pluviales (blé, coton et millet) dans des zones semi-arides de six pays (Senegal, Burkina faso, Kenya, Tanzania, Pakistan et Tajikistan), a augmenté de $+ 4.7 \pm 9,6\%$ en tenant en compte des effets du CC et des $[\text{CO}_2]$ élevées, tandis que le rendement moyen diminue de $- 4.5 \pm 7.3\%$ en excluant les effets des $[\text{CO}_2]$ élevées. Le rendement en grain du blé de printemps a augmenté de $+ 10.4 \%$ (Högy et al. 2009) et le rendement de riz a augmenté de $+ 7$ à $+ 15\%$ (Kim et al., 2003, Long et al. 2006) dans des $[\text{CO}_2]$ élevées au cours des expériences sur FACE (Free Air Concentration Enrichment). Long et al. (2006), ont déduit que l'effet fertilisant du CO_2 , sur les rendements, est beaucoup plus faible dans les expériences FACE que dans les expériences en chambres fermées et des prévisions des modèles de culture. Des analyses récentes des études en FACE indiquent qu'à 550 ppm de $[\text{CO}_2]$ atmosphérique, les rendements du blé observés en terre sèche australienne ont augmenté de $+ 26\%$ dans des conditions non soumises à des contraintes (O'Leary et al., 2015). Contrairement à Tubiello et al. (2007a), qui ont signalé que la réaction des rendements des cultures à l'augmentation des $[\text{CO}_2]$ était similaire, dans l'ensemble des données expérimentales en FACE et hors FACE, comme ils ont rapporté que les résultats de la plupart des simulations de l'effet fertilisant du CO_2 , sur les rendements, faites avec des modèles de culture, étaient compatibles avec les résultats des expériences conduites en FACE. Tubiello et al. (2007 a), ont supposé que la différence dans la réponse des rendements à un enrichissement de l'air en CO_2 , observée dans des expérimentations réelles ne modifieraient pas de manière significative les projections de l'alimentation mondiale au XXIème siècle.

Autrement, une méta-analyse menée par Myers et al. (2014), a démontré que la fertilisation des cultures par une $[\text{CO}_2]$ élevée, aurait probablement des effets néfastes sur la valeur nutritionnelle de nombreuses cultures vivrières clés, à cause d'une baisse prévue des concentrations de minéraux essentiels et de protéines, qui pourrait avoir des conséquences graves sur la sécurité alimentaire (Müller et al. 2014). Selon Cline. (2008) à l'échelle globale, des projections pour 2080, estiment un déclin de la productivité agricole (production à l'hectare) de $- 16\%$ sans l'effet fertilisant de CO_2 (Figure.19) et une diminution de $- 3\%$ si les avantages de la fertilisation par CO_2 se matérialisent réellement (Figure.20). Les pertes sont particulièrement concentrées dans les pays en développement (situés dans les basses latitudes). Alors que les pays industrialisés (situés sur les hautes latitudes), enregistrent des pertes allant de $- 6\%$ sans effet fertilisant de CO_2 à des gains de $+ 8\%$ avec, les pays en développement vont subir des pertes d'environ $- 25\%$ sans effet fertilisant de CO_2 (les pays les plus durement touchés seront ceux de l'Afrique, l'Amérique latine et l'Asie du Sud) et des pertes de $- 10$ à $- 15\%$ si cet effet est inclus. Les pertes pourraient atteindre des niveaux dévastateurs chez certains des plus pauvres pays (plus de $- 50\%$ au Sénégal et au Soudan). Les dégâts seront généralement plus importants dans les pays situés plus près de

l'équateur, où les températures ont déjà tendance à être proches des niveaux de tolérance des cultures (Figure.20).

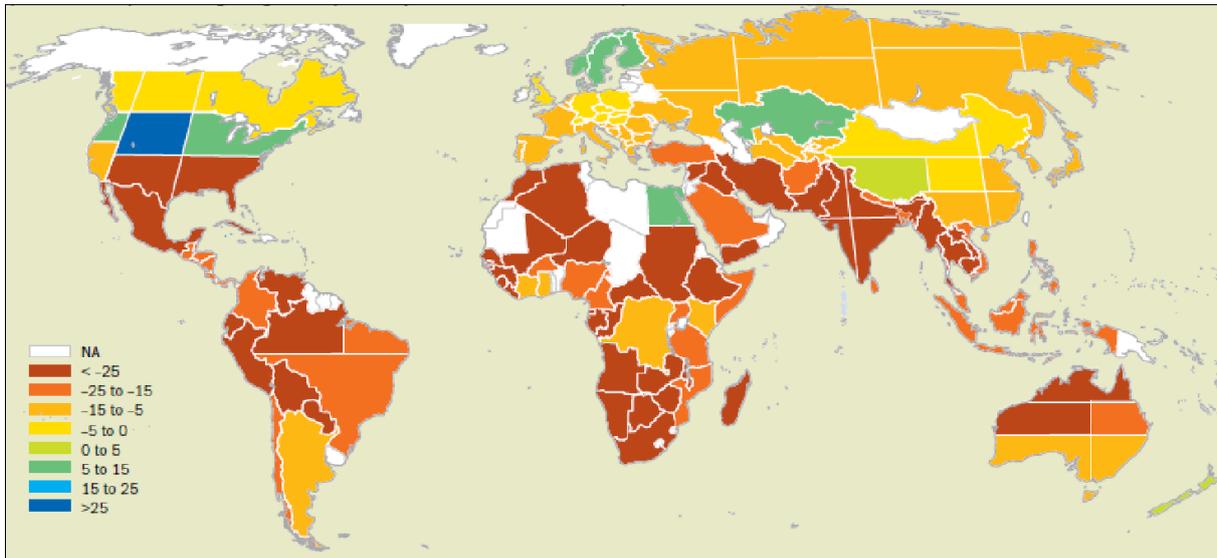


Figure 19. Variation en pourcentage de la productivité agricole induite par le changement climatique sans l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'air en CO₂ en 2080 par rapport à l'année 2003 (Cline, 2008)

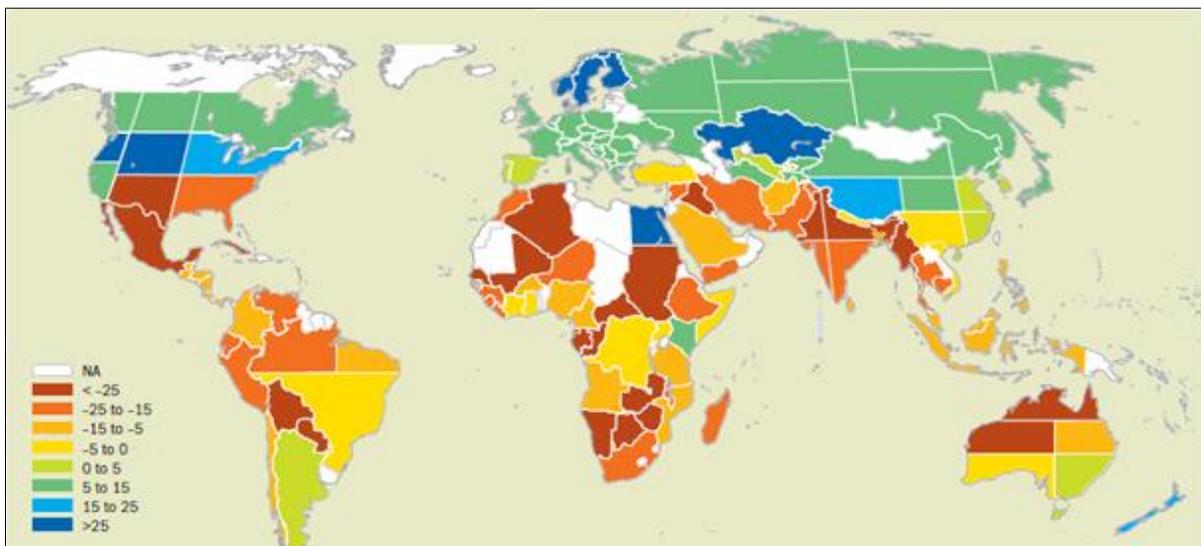


Figure 20. Variation en pourcentage de la productivité agricole induite par le changement climatique avec effet fertilisant de l'enrichissement de l'air en CO₂ en 2080 par rapport à l'année 2003 (Cline, 2008)

Selon Tubiello et al. (2007 c), les modélisateurs et les phytophysiologistes reconnaissent tous deux que les impacts d'une teneur élevée en CO₂, telle que mesurée dans des contextes

expérimentaux et ensuite mise en œuvre dans des modèles, peut néanmoins surestimer les réactions réelles sur le terrain, en raison de nombreux facteurs limitant comme les ravageurs, la concurrence avec les mauvaises herbes, la qualité du sol et de l'eau et un approvisionnement en eau adéquat qui peuvent fortement limiter la réalisation de tout gain potentiel des plantes suite à la hausse des $[CO_2]$, rajouté à ça, ces inconvénients ne sont pas bien compris à grande échelle, ni bien mis en œuvre dans les modèles ce qui augmente l'incertitude dans la simulation des effets de CO_2 sur les cultures, donc le développement futur des modèles de culture, devrait inclure l'impact de ces facteurs supplémentaires afin de permettre des simulations plus réalistes du CC. En attendant l'arrivée de nouveaux modèles sophistiqués, les études prévoyant des rendements futurs dans le contexte du CC, devraient le faire en intégrant des plages de sensibilité pour la réponse des cultures à une émission de CO_2 élevée, afin de mieux prendre en compte la plage d'incertitude associée (GIEC, 2007)

2.5 Impact de la fréquence des événements climatiques extrêmes sur les cultures

Dans de nombreuses régions du monde, la nature des sécheresses, des inondations et des températures extrêmes a considérablement changé depuis le milieu du XX^{ème} siècle (GIEC, 2012; WMO, 2014). Les pertes de production causées par la variabilité accrue de climat seront probablement plus élevées que les pertes estimées par les changements dans les moyennes des variables climatiques (Tubiello et al. 2007b). Les catastrophes dues aux conditions météorologiques extrêmes peuvent causer des dommages importants aux cultures et aux infrastructures du système alimentaire, et probablement elles peuvent déstabiliser les systèmes alimentaires et menacer la sécurité alimentaire locale et même globale. Ces dernières années, près du quart des dommages et pertes résultant des catastrophes climatiques ont été subis par le secteur agricole des pays en développement (FAO, 2015), rajouté à ça que de telles catastrophes devraient devenir plus courantes dans le futur (Battisti et Naylor, 2009 ; GIEC, 2012 ; UNISDR, 2013).

Lesk et al. (2016) ont estimé pour la première fois à l'échelle mondiale, les pertes de production céréalière résultant des catastrophes météorologiques extrêmes observées entre 1964 et 2007, ils ont déduit que le déficit de production des céréales estimé à - 9 % qui est due aux sécheresses est associé à une diminution à la fois de la superficie récoltée (baisse de - 4.1%) et des rendements (baisse de - 5.1%), alors que le déficit de production estimé à - 10% qui est causé par les chaleurs extrêmes est due uniquement à la baisse des rendements de céréales de - 7.1%. Selon ces auteurs, les sécheresses persistantes risquent de détruire complètement les champs cultivés et échouent les semis, tandis que les chaleurs extrême peuvent affecter les stades de développement des cultures céréalières et réduire leurs rendements, mais sans endommager gravement le champ. Un autre

résultat important de cette étude indique que les céréales dans les systèmes agricoles plus développés d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Australie ont été les plus durement touchés par la sécheresse, avec un déficit de production moyen de - 19,9% contre - 12,1% en Asie, - 9,2% en Afrique, et aucun effet significatif en Amérique latine et au Caraïbes. Cet impact plus sévère de la sécheresse sur la production dans les pays développés a été provoqué par un déficit de rendement substantiel de - 15,9%, sans réduction significative des superficies récoltées, parmi les explications données par Lesk et al. (2016) à ce résultat, ils ont suggéré que dans les pays à faible revenu, les systèmes de cultures diversifiés sur des petits champs et basés sur les stratégies de minimisation de risque climatique, permettent de mieux résister à la sécheresse, que dans les systèmes de monocultures à grande échelle, qui maximisent le rendement dans les pays développés.

Wahid et al. (2007) suggèrent que des températures extrêmement élevées supérieures à 30°C peuvent causer des dommages physiques permanents aux plantes et, lorsqu'elles dépassent 37°C, peuvent même endommager les semences pendant le stockage, ils ajoutent que le type de dommage dépend de la persistance de la température, et de la rapidité de son augmentation ou de la capacité des plantes à s'adapter, cela dépend aussi de l'espèce, du stade de développement de la plante. À mesure que le climat change, la fréquence des périodes d'augmentation des températures au-dessus des seuils critiques pour le maïs, le riz et le blé, devrait augmenter dans le monde entier (Gourdji et al., 2013). Les seuils climatiques comprennent des niveaux des températures absolues nuisibles aux rendements des cultures, car ils perturbent le déroulement des stades de développement particuliers comme la floraison et le stade de formation des grains (Wheeler et al., 2013, Wollenweber et al., 2003, Asseng et al., 2011). En Angleterre, Ferris (1998) a déduit que les rendements en grain de blé de printemps, étaient plus sensibles à la température maximale au milieu de l'anthesis. Il a suggéré que ce résultat confirme que les rendements du blé seraient considérablement affectés par le CC, qui se manifeste par une variabilité accrue de climat, des températures élevées et des extrêmes de température qui deviennent plus fréquentes. La stérilité des épillets du riz était en corrélation positive avec la température maximale au cours des 20 jours précédant et suivant l'anthesis (Tao et al., 2013). Le maïs présente une viabilité pollinique faible à des températures supérieures à 36°C (Porter et Semenov, 2005). En Europe, durant l'été 2003, des extrêmes climatiques caractérisés par la hausse des températures allant jusqu'à + 6°C au-dessus des moyennes à long terme, et des déficits des précipitations allant jusqu'à 300 mm, ainsi dans la vallée du Pô en Italie, une chute record des rendements de Maïs estimée à - 36% a été observée (Ciais et al., 2005).

Les dégâts causés par le gel sont un problème économique au niveau mondial. En Australie, les pertes économiques dues au gel sont estimées à au moins à 120 millions de dollars par an. Le gel

autour de la floraison et de l'épiaison a été identifié comme une période de risque important pour le blé et les autres cultures céréalières. Le gel au début de la floraison et l'épiaison peuvent entraîner une stérilité partielle ou complète des fleurons et des épillets entiers, et par conséquent il peut induire une baisse de nombre de grains et de rendement (Al-Issawi et al., 2012; Marcellos et Single., 1984). Selon Xiao et al. (2018), en Chine, sous réchauffement climatique observé durant la période 1981-2010, le risque de gelée tardive printanière entre le stade de l'allongement de la tige et la floraison n'a pas été diminué de manière significative, dans les régions productrices de blé d'hiver. Bien que le réchauffement climatique observé réduise les phénomènes de gel par l'augmentation des températures minimales, il accélère également la phénologie du blé, ce qui augmente les risques de gel printanier en avançant la date de déroulement de stade situé entre l'allongement de la tige et la floraison, qui s'avère très sensible aux gelées printanières. Ainsi, ils ont suggéré, que la quantification des tendances et des impacts futurs des dégâts causés par le gel printanier sur la production de blé, sera indispensable au développement des stratégies d'adaptation de cette culture, face aux tendances futures des gelées, et à la sécurisation de la production de blé en Chine et dans d'autres régions du monde touchées par le gel.

2.6 Combinaison des impacts des changements des températures, précipitations et des concentrations en CO₂

Tan et al. (2018), ont effectué des expériences sur l'effet combiné de la hausse des températures et des [CO₂] sur le blé d'hiver en Chine, au cours de la période 2013-2016. Ils ont constaté que les dates d'occurrence des stades de croissance post-hivernaux de blé, ont avancé et sont passées à une période plus froide de cycle de croissance, sous l'effet de l'augmentation des températures de (+ 2.5~3.0 °C). Cela s'est répercuté sur le déroulement des stades de floraison et de l'anthèse ce qui provoque une réduction de nombre de grains par épée de - 10 à - 31%, cependant ils ont constaté que le poids de 1000 grains a augmenté durant les trois campagnes de + 8 à + 9% sous l'effet de l'augmentation des émissions de CO₂ (de 400 à 600 ppm), cet effet fertilisant de CO₂ n'a pas pu compenser l'effet négatif de la hausse des températures sur les rendements de blé. Une autre étude de Muller (2016) conduite aussi en Chine, a montré qu'en 2050, les températures et les pluies augmentent sous les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, il a déduit que dans la première moitié de 21^{ème} siècle, pour les cultures (maïs, blé et riz), conduites en pluvial, les précipitations sont le principal facteur de changement de leur rendements, tandis que si elles sont conduites en irrigué, l'augmentation de [CO₂] sera le principal facteur qui influe sur leur rendements et dans une moindre mesure, l'augmentation de l'ET₀. Cependant il a signalé que les gains de rendements de riz et de blé en irrigué sont plus importants que ceux de maïs irrigué. Cela indique que l'effet fertilisant de CO₂ est plus fort sur le riz et le blé que sur le maïs. Étant donné

que le niveau de CO₂ augmente davantage sous le RCP 8.5, les rendements augmentent également davantage pour ce scénario. Dans une analyse statistique pour différents pays d'Afrique subsaharienne, Schlenker et Lobell (2010) ont montré que les impacts sur les rendements des cultures dus aux changements de température sont beaucoup plus forts (- 38% à + 12%) que les impacts dus aux changements de précipitations (-3 % à + 3%) pour cinq cultures différentes (maïs, sorgho, mil, arachides et manioc).

Les résultats expérimentaux de Manderscheid et al. (2003), soutiennent la théorie de la diminution attendue de l'efficacité d'utilisation quotidienne du rayonnement de flux net de CO₂, avec une [CO₂] ambiante et l'augmentation de l'effet fertilisant du CO₂ avec la hausse de la température au cours de la phase de pré-anthèse chez le blé. Leurs résultats indiquent également que l'interaction positive CO₂ x température sur l'assimilation du couvert disparaît lors du remplissage du grain, ce qui pourrait être responsable de la diminution de l'effet fertilisant du CO₂ sur la biomasse végétale entre l'anthèse et la maturité du grain.

3. Modélisation des cultures

3.1 Définition d'un modèle de culture

Un modèle est une reproduction simplifiée de la réalité qui permet de fournir de l'information sans passer par des expérimentations réelles (Rossiter, 2003). Selon Jame et Cutforth (1996) les modèles de simulation de cultures sont des formules mathématiques, qui représentent les réactions qui se produisent dans la plante et les interactions entre la plante et son environnement. Le modèle simule ou imite le comportement d'une culture réelle, en prévoyant la croissance de ses composants, tels que les feuilles, les racines, les tiges et les grains. Ainsi, un modèle de croissance des cultures prédit non seulement l'état final de la biomasse totale ou du rendement exploitable, mais contient également des informations quantitatives sur les principaux processus intervenant dans la croissance et le développement d'une plante (Otang-Darko et al., 2013). Les modèles ne peuvent pas prendre en compte l'ensemble des processus qui entrent en jeu. Par conséquent, un modèle de culture doit être envisagé comme un support d'interprétation d'une réalité très complexe (Jego, 2008). Les modèles de culture intègrent les connaissances de différentes disciplines et fournissent aux chercheurs les moyens pour mener des expériences de simulation afin de compléter les expériences réelles (Jones et al., 2003).

Dans la modélisation de la croissance des cultures, les connaissances actuelles sur la croissance et le développement des plantes issues des diverses disciplines, telles que la physiologie des cultures, l'agrométéorologie, les sciences du sol et l'agronomie, sont intégrées de manière cohérente, quantitative et orientée sur les processus (Otang-Darko et al., 2013)

Les modèles de culture sont des outils puissants pour évaluer le risque de produire une culture donnée dans un complexe sol-climat particulier et pour faciliter les décisions de gestion minimisant le risque de production agricole (Diepen et al. 1989; Tsuji et al. 1998; Van Ittersum et al., 2003; Hoogenboom et al., 2004; Leng et al., 2016 ; Neupane, 2019).

Le centre de focalisation et les domaines d'application des modèles de culture ont changé au cours de temps en fonction des besoins de la société (Jones et al., 2016). Ils ont contribué à l'aide à la décision (Kadiyala et al., 2015), et à l'évaluation des risques agricoles (Rader et al., 2009), et à l'évaluation de l'apport des infrastructures publiques sur les projets de développement agricole financés par des fonds publics (Khandker et al., 2009). La dernière décennie a été marquée par un recours accru aux modèles ensembles climat-culture visant à informer sur l'adaptation au CC (Challinor et al., 2013). Les modèles peuvent aider à identifier des options de gestion permettant de maximiser les objectifs de durabilité aux gestionnaires des terres et aux décideurs politiques dans l'espace et dans le temps, à condition que les informations nécessaires sur les sols, la gestion, le climat et les données socio-économiques soient disponibles (Jones et al., 2017).

3.2 Historique de développement des modèles de cultures

Les études sur la production végétale sont traditionnellement réalisées en utilisant une recherche agronomique conventionnelle basée sur l'expérimentation, dans laquelle les fonctions de production végétale sont dérivées d'une analyse statistique sans se référer aux principes biologiques ou physiques sous-jacents impliqués (Jame et Cutforth, 1996). L'application de l'analyse de corrélation et de régression a permis de mieux comprendre qualitativement les variables et leurs interactions intervenant dans les systèmes de culture et a contribué aux progrès de la science agricole (Kumar et Chaturevdi, 2009). Cependant, les informations quantitatives obtenues à partir de ce type d'analyse sont très spécifiques à chaque site. Les informations obtenues ne peuvent être appliquées de manière fiable qu'à d'autres sites où le climat, les éléments importants de sol, et de la gestion des cultures, sont similaires à ceux utilisés pour développer les fonctions d'origine. Ainsi, l'applicabilité quantitative des modèles de simulation de rendement des cultures basés sur la régression pour la prise de décision est extrêmement limitée. De plus, en raison de la variabilité inévitable liée aux conditions météorologiques, il faut plus de 10 ans pour développer des relations statistiques utiles pour la prise de décisions en agriculture. Les preuves statistiques basées sur des études à long terme montrent généralement que plus de 40% de la variation totale des résultats est généralement associée à une erreur expérimentale (Jame et Cutforth, 1996).

L'histoire de développement des modèles de culture a débuté durant les années 1960 avec les essais visant à quantifier les relations entre le rendement des cultures et l'utilisation de l'eau, ce qui

aboutit à la conception des modèles simples de bilan hydrique (Jame, 1992). Ensuite (De Wit, 1965), a fait les premières tentatives de modélisation de taux de photosynthèse des canopées des cultures, ainsi les résultats obtenus par le modèle qu'il a développé, ont notamment servi à estimer la production agricole potentielle dans certaines régions du monde, et à fournir des indications pour la gestion des cultures et la sélection génétique (De Wit, 1967; Linneman et al., 1979). Ceci a été suivi en 1970, par la construction d'un simulateur de croissance élémentaire (ELCROS) par De Wit et al. (1970). Ce modèle considère la respiration comme une fraction fixe de la photosynthèse, et plus tard comme une fraction fixe par jour de la biomasse, plus une quantité proportionnelle au taux de croissance. Ensuite il est rajouté un équilibre fonctionnel entre la croissance des racines et des tiges (par lequel les cultures tentent de maintenir une teneur en eau optimale) (Penning de Vries et al., 1974). En 1978, l'introduction de la micrométéorologie dans les modèles (Goudriaan, 1977) et la quantification de la résistance de la canopée aux échanges gazeux, ont permis aux modélisateurs d'améliorer la simulation de la transpiration et d'évoluer vers le simulateur de croissance basique Basic Crop Simulator (BACROS) (De Wit et Goudriaan, 1978). En 1981, le premier modèle de simulation d'azote du sol a été mis en œuvre pour la prévision des réponses des cultures, dans des conditions où les quantités d'eau et d'azote sont limitées (Seligman et van Keulen, 1981), ce modèle a été la base de développement des futurs modèles d'azote dans le sol tel que : APSIM, DSSAT et d'autres modèles de culture. Entre 1982 à 1986, il y'a eu lieu la mise à jour des modèles CERES (maïs et blé) et de modèles GRO (SOYGRO et Pnutgro) (Wilkerson et al. 1983; Boote et al. 1986), ainsi les modèles CERES qui établissent pour la première fois une relation globale entre l'eau et l'azote du sol, ils ont été appliqués dans la modélisation des cultures dans de nombreuses régions du monde. A la fin des années 1990 jusqu'au début des années 2000, la construction et diffusion de jeux de données globales sur les superficies cultivées, les dates de semis et les rendements, a permis aux chercheurs d'effectuer des simulations, à une résolution plus fine avec divers modèles, en se basant sur des hypothèses et des entrées plus clairement documentées (Ramankutty et Foley, 1999 ; Ramankutty et al., 2008). Durant les années 2000, l'intérêt croissant pour l'atténuation des GES et l'importance des services écosystémiques, ont conduit à des modèles d'analyse de l'atténuation des GES dans l'agriculture via la séquestration du carbone dans le sol, le boisement, la réduction des émissions du bétail; ceci a également conduit à l'établissement de liens entre les modèles économiques et les modèles de culture, d'élevage, d'hydrologie et d'écosystème (Jones et al., 2017). En 2006, Long (2006) a contesté la représentation des effets du CO₂ dans les simulations des modèles de culture, ce qui ouvrit un débat entre expérimentateurs et modélisateurs sur la fiabilité des modèles de culture, pour la prévision du rendement dans les climats futurs, ceci a donné naissance à beaucoup d'étude d'évaluations des effets du CO₂ en interaction avec la

température et autres facteurs. Durant la période 2005–2010, le développement de modèles de système terrestre (Earth System Models ou ESMs), composants des modèles de circulation générale (MCG), qui intègrent des variables : physico-chimiques, écologiques et socio-économiques au sein d'un cadre commun, a conduit à de nouvelles méthodes pour associer des modèles de simulation de cultures à des schémas de surface terrestre des modèles climatiques numériques (Challinor et al. 2004). En 2010, l'initiation du projet de comparaison et d'amélioration de modèles agricoles (AgMIP), qui est un programme mondial des scientifique en agriculture, a mené à des comparaisons de modèles et à des initiatives visant à les améliorer, en capturant l'imagination et l'intérêt des modélisateurs agricoles du monde entier (Rosenzweig et al., 2013 a, 2013 b; Asseng et al.2013).

3.3 Type de modèles de culture

Les modèles de simulation sont classés en deux grands groupes: empiriques et mécanistes. Cependant, au sein de ces deux classifications, il existe d'autres catégories qui, en fonction de leurs caractéristiques, ont été nommées différemment.

3.3.1 Modèles statistiques ou mécanistes

3.3.1.1 Modèles statistiques

Ces modèles ont été les premiers modèles de culture utilisés pour les estimations de rendement. Ils sont basés sur l'ajustement à une fonction permettant de prédire les rendements des cultures à l'aide des variables météorologiques observées et des statistiques des rendements régionaux enregistrées sur plusieurs années. Les rendements moyens régionaux sont ensuite régressés par rapport au temps et aux données climatiques pour révéler leur tendance générale (Thompson, 1969). Cependant ces modèles ne fournissent pas d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique de la culture (Guillaume, 2011). Jones, (2016), a supposé que les données historiques utilisées pour créer des modèles statistiques sont des échantillons d'une population, de sorte que le modèle peut être utilisé pour prédire les rendements de ce même échantillon dans les années à venir, avec des conditions météorologiques différentes. Ainsi, il a indiqué que dans la plupart des cas, les résultats des modèles statistiques ne peuvent pas être extrapolés hors la région étudiée car les données utilisées pour l'estimation des paramètres de modèle ne représentent pas le sol, la gestion de la culture, les conditions météorologiques et les autres conditions rencontrées ailleurs en dehors de l'échantillon étudié. En revanche, Jones, (2016), a signalé que les modèles statistiques sont mal adaptés pour estimer les impacts du CC dans le futur au-delà de la plage de données historiques, car ils ne peuvent pas représenter des changements non observés dans la gestion de la culture, les propriétés du sol, les ravageurs et les maladies, et l'influence de l'augmentation des [CO₂] dans l'atmosphère qui peuvent arriver dans le futur. Malgré ces

limitations, les modèles statistiques peuvent être utiles surtout s'il y a suffisamment de données pour les développer, car ils peuvent fournir des informations sur les impacts historiques observés sur les rendements passés et informer d'autres types de modèles (Antle, 1983; Lobell et al., 2011; Roberts et al., 2013; Tack et al., 2015). Pareillement, Shi et al. (2013), ont rapporté que l'utilisation des relations statistiques qui lient les rendements des cultures aux variables climatiques, déduites des observations, permet d'informer les modèles des cultures sur la réponse des cultures au CC, ce qui peut servir à prédire les rendements futurs des cultures dans des scénarios de CC.

3.3.1.2 Modèles mécanistes (empiriques)

Dans la conception des modèles mécanistes, De Wit (1965) a recommandé de distinguer deux niveaux, le niveau système et le niveau de processus immédiatement inférieur (explicatif). Ces modèles ont la capacité d'imiter des processus physiques, chimiques ou biologiques importants de la culture et de décrire comment et pourquoi une réponse particulière a eu lieu. L'analyste commence généralement par un empirisme et dans la mesure où il acquiert des connaissances, des variables et des paramètres supplémentaires sont introduits pour expliquer la production de la culture. Ainsi, l'analyste adopte une approche réductionniste. La plupart des modèles de croissance des cultures entrent dans cette catégorie (Gálvez, 2008).

Dans les modèles mécanistes, la productivité (rendement des cultures) est déterminée par des équations représentant la physiologie d'une culture en réponse aux variables environnementales (Jones et al. 2003 ; Keating et al. 2003), cependant, ces modèles nécessitent un niveau élevé de détails environnementaux, de sorte que les données d'entrée peuvent être difficiles à acquérir. Le recours aux ordinateurs dans la science, a permis de développer des modèles mécanistes pour simuler dans le système plante-atmosphère, des processus photosynthétiques, tels que l'interception de la lumière, l'absorption de CO₂, la respiration, la production de la biomasse, la répartition de la biomasse dans divers organes de la plante, ainsi que la perte de CO₂ pendant la respiration (Basso et Ritchie, 2015). Parallèlement dans le système de sol, l'approche mécanistique a été utilisée pour simuler la dynamique de l'eau dans sol due à l'infiltration, à l'évaporation, au drainage et à l'absorption par les racines (Ritchie, 1998).

3.3.2 Modèles statiques et dynamiques

3.3.2.1 Les modèles statiques

Les modèles statiques représentent des relations entre des variables qui ne changent pas dans le temps. Par conséquent, leur valeur finale est connue et non leur évolution dans le temps (Bandi, 2003). Un exemple de modèle statique est celui contenant tous les calculs nécessaires pour

représenter la relation entre la respiration et la croissance de la culture, cette relation est dérivée de connaissance des processus biochimiques sous-jacents. Un autre exemple de modèle statique est un modèle utilisé pour calculer la répartition de la lumière sur les feuilles, basé sur la connaissance de l'architecture de la canopée, propriétés des feuilles, l'exposition au soleil... etc. Ces modèles statiques sont souvent des composants de modèles dynamiques (Rabbinge et al., 1989).

3.3.2.2 Modèles dynamiques

Selon Rimmington et Charles-Edwards (1987), les modèles dynamiques décrivent l'évolution du système dans le temps. Il est donc possible de suivre l'évolution temporelle de chacune des variables du système (exemple: bilan azoté et hydrique dans le sol). Ces mêmes auteurs, rapportent que dans le développement des modèles de simulation dynamique de la croissance végétale, le modélisateur suppose que l'état de la plante à tout moment pouvait être décrit quantitativement par des valeurs numériques, d'un nombre discret de variables d'état définies. Ces variables caractérisent l'état du système de croissance des plantes. Elles peuvent être notamment choisies parmi les propriétés des composants d'une plante, telles que masses de feuilles ou de tige, surface des feuilles ou nombre de feuilles. Les modèles dynamiques supposent que les variations temporaires des valeurs de ces variables d'état peuvent être décrites mathématiquement (Dourado-Neto et al., 1998).

Ces modèles dynamiques peuvent être utilisés pour simuler des réponses multiples de plusieurs variables dans des intervalles de temps bien déterminés, selon les besoins des utilisateurs (Wallach et al. 2014), et peuvent ainsi comparer les effets des décisions ou des politiques alternatives sur les compromis entre ces différentes réponses. Ces modèles de système dynamiques peuvent comporter des composants mécanistes et fonctionnels. Des exemples de modèles dynamiques pour les systèmes de culture sont ceux de la série de modèles DSSAT (Jones et al. 2003), APSIM (Keating et al. 2003), CROPSYST (Stöckle et al. 2003) et EPIC (Williams et al. 1984). Toutefois, étant donné que certains de ces modèles sont extrêmement complexes et contiennent de nombreuses variables et paramètres descriptifs, nécessitant ainsi de nombreuses entrées et des durées d'exécution longues, des modèles abrégés ou synthétiques sont parfois dérivés de modèles beaucoup plus complexes à des fins spécifiques (tel que les modèles de Jones et al., 1999; Chikowo et al., 2008; Dzotsi et al., 2013). Cette approche est particulièrement utile lorsqu'il est souhaité d'intégrer des modèles de culture, par exemple, à des modèles de systèmes agricoles plus complets, tels que des modèles d'analyses économiques à l'échelle locale, nationale ou mondiale qui peuvent être exécutés.

3.3.3 Modèles déterministes et stochastiques**3.3.3.1 Modèles déterministes**

Les modèles déterministes attribuent une valeur unique à chaque variable système (Bandi, 2003). Ils établissent des prévisions pour les quantités (par exemple, la production végétale) sans distribution probabiliste, variance ou élément aléatoire associé. Les variations sont normales dans les systèmes biologiques et agricoles, en raison des imprécisions dans les données collectées et de l'hétérogénéité du matériel utilisé. Dans certains cas, les modèles déterministes peuvent être adéquats malgré ces variations inhérentes, mais dans d'autres, ils peuvent s'avérer insatisfaisants, par exemple pour la prévision des précipitations. Plus l'incertitude du système n'est grande, plus les modèles déterministes deviennent inadéquats (Gálvez, 2008).

3.3.3.2 Les modèles stochastiques

Les modèles stochastiques indiquent plutôt pour une variable une distribution de valeurs (Bandi, 2003). Lorsque la variation et l'incertitude atteignent un niveau élevé, il est conseillé de développer un modèle stochastique qui donne une valeur moyenne attendue avec une variance associée. Cependant, les modèles stochastiques ont tendance à être difficiles à manipuler et deviennent rapidement très complexes. Par conséquent, il est conseillé d'essayer de résoudre le problème initialement avec une approche déterministe et d'utiliser l'approche stochastique uniquement si les résultats ne sont pas adéquats ou satisfaisants (Gálvez, 2008).

3.3.4 Modèles spécifiques et modèles génériques

Une classification des modèles de culture existe en fonction du nombre de cultures prises en charge et des choix de formalismes opérés lors de l'élaboration du modèle de culture. Ainsi les modèles de culture spécifiques sont distingués des modèles de cultures génériques.

3.3.4.1 Les modèles spécifiques

Ont été développés pour la représentation de la croissance et du développement d'une culture donnée, généralement dans l'objectif de répondre à une question précise. Ils intègrent des processus spécifiques à l'espèce concernée et prennent en compte différents facteurs de production en fonction des objectifs d'application. Parmi ces modèles spécifiques, il figure le modèle CERES-Wheat qui est utilisé par la simulation de blé dur dans diverses régions de la Méditerranée par Pecetti et al. (1997). Le modèle CERES – maïs s'est révélé capable de prédire avec précision la variabilité du rendement, l'absorption d'azote et la réaction de croissance du maïs à l'azote (Pang et al., 1997; Bert et al., 2007).

3.3.4.2 Les modèles génériques

Les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce à travers d'options de simulation et des différentes valeurs des paramètres (Wang et Engel, 2002). Le développement de tels modèles permet de rassembler les connaissances acquises sur le fonctionnement des espèces et fournissent un cadre d'évaluation pour l'identification des ressemblances et des différences entre cultures (Brisson et al., 2006). Parmi leurs champs d'application, il ya lieu de citer leur aptitude à simuler des successions de cultures, cela permet d'évaluer les performances des systèmes de culture et non pas uniquement les performances d'un itinéraire technique. Les modèles APSIM (Keating et al., 2003), CROPSYST (Stockle et al., 2003), APES (Van Ittersum et al., 2008) et STICS (Brisson et al., 2003 ; Brisson et al., 2008), AquaCrop (Steduto et al., 2012) ont ainsi été développés dans ces objectifs. Qu'il s'agisse des modèles spécifiques ou génériques, les différences variétales sont prises en compte à travers de paramètres génotypiques ou encore variétaux (Mavromatis et al., 2001).

3.4 Application de la modélisation des cultures

3.4.1 Prévision de rendement

Des estimations raisonnablement précises de la superficie et du rendement avant la récolte effective ont une très grande valeur pour la planification des politiques agricoles. Le coût relativement faible et la rapidité de l'évaluation rendent, les modèles de simulation de la croissance des cultures prometteurs, pour les zones où des données météorologiques journalières nécessaires sont facilement disponibles. Dans cette approche, le modèle est exécuté à l'aide des données météorologiques observées pendant la saison de culture pour la région géographique d'intérêt. Les données météorologiques pour les années typiques sont utilisées pour poursuivre les simulations jusqu'à la récolte. Horie et al. (1992) a montré un exemple où un modèle de culture est utilisé pour prévoir les rendements de riz dans différentes régions du Japon, ce modèle a été d'abord déroulé à l'aide des bases de données météorologiques régionales et des données des rendements historiques au Japon.

Selon Iizumi et al. (2018), la prévision de rendement global présente un avantage par rapport à la prévision régionale, car elle fournit des informations sur les variations possibles de rendement, tant dans les pays exportateurs que dans les pays importateurs de denrées alimentaires, ce qui a fourni des données importantes pour les organismes du secteur de l'alimentation, chargés de maintenir les équilibres alimentaires nationaux. Ces mêmes auteurs ont appliqué des modèles statistiques pour la simulation des rendements globaux des quatre cultures : maïs, soja, riz et blé, en utilisant des données des prévisions des températures et des précipitations saisonnières

globales, dérivées d'un ensemble multimodèles climatique, en appliquant la méthode de la mosaïque, cette dernière a permis de prédire trois mois avant la récolte, et d'une manière fiable.

3.4.2 Optimisation de la gestion des cultures

La modélisation de la croissance des cultures peut être utilisée pour faire ajuster la technologie agricole aux ressources des agriculteurs, et pour analyser les raisons précises de l'écart de rendement. Les modèles de culture peuvent être des outils essentiels pour optimiser la gestion de l'eau d'irrigation et des engrais, afin d'améliorer la productivité des cultures, par exemple, Hammad et al. (2017) ont appliqué le modèle de culture (CSM) -CERES-Maize, pour déterminer les doses optimales d'eau d'irrigation, et d'apport en azote qui aboutissent à un meilleur rendement de maïs, avec moins de dépenses financières dans des conditions semi-arides du Pakistan. Selon Singh (1994), des études effectuées en Chine, en Inde, en Indonésie et aux Philippines, ont montré que les recommandations du modèle de simulation, contribuaient à accroître l'efficacité d'utilisation d'engrais de 15 à 20%. Zhang et al. (2018 b) ont utilisé le modèle CERES-Blé, pour l'évaluation des stratégies d'irrigation limitées afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau, et le rendement de blé d'hiver, dans la Plaine du nord de la Chine, ils ont trouvé qu'un seul apport en eau d'irrigation, durant le stade d'apparition de deuxième nœud, permis une plus grande efficacité d'utilisation de l'eau par le plant de blé, ce qui conduit à minimiser l'impact sur le revenu net des agriculteurs, ce qui économiquement moins coûteux que l'application des méthodes de conservation de l'eau de sol qui sont économiquement très coûteuse.

3.4.3 Dates de semis optimales pour la production de semences hybrides

Xu (1995), rapporte que la nécessité d'acheter des semences, à chaque saison de plantation, et le coût élevé de la production de semences, constituent un obstacle majeur à l'utilisation de la technologie des semences hybrides. Il rajoute que cette production des semences limitée est due en grande partie à la médiocrité du croisement, et à la floraison asynchrone des parents masculins et féminins. Il a signalé que des facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent, pendant la période de pollinisation et de fertilisation, joue un grand rôle dans la régulation du pourcentage de croisement. Ainsi, il a suggéré que pour les synchroniser les plants parents, à plusieurs endroits, il faut déterminer les dates optimales de plantation. Selon ce même auteur, la simulation des croisements des cultures par des modèles de cultures est un outil plus efficace, pour prendre des décisions, concernant le calendrier de plantation des parents dans différents environnements. A titre indicatif, en Australie, Rodriguez et al. (2018) a relié le modèle de culture APSIM à un système de prévision climatique saisonnière habile, pour éclairer la

reproduction optimale des hybrides de maïs, pour augmenter les profits des agriculteurs et réduire les risques.

3.4.4 Sélection génétique des variétés à cultiver

Boote et al. (1992) proposait d'utiliser les modèles de culture en tant qu'outils d'évaluation variétale, afin d'assister et d'orienter les progrès génétiques et l'utilisation de nouveaux génotypes. Cette idée d'utiliser les modèles de culture comme outils d'aide à la sélection et à l'utilisation opportune des caractéristiques génotypiques s'est progressivement développée, afin d'identifier les facteurs d'adaptabilité, pour le rendement ou pour toute autre composante d'intérêt (Shorter et al., 1991 ; Saulescu et Kronstad, 1995). Plusieurs chercheurs (Hoogenboom et White, 2003 ; Letort et al., 2008 ; Maldonado-Ibarra et al., 2013) ont introduit la composante de la variabilité génotypique de la plante dans les modèles de culture. Il existe quatre catégories d'utilisation des modèles de culture dans la sélection génétique des variétés à cultiver : la première catégorie d'utilisation, repose sur l'application couplée d'outils de sélection et de modèles de culture intégrant l'effet du génotype, à travers les formes alléliques de différents gènes, afin d'identifier les combinaisons génotypiques les plus intéressantes à réaliser, pour plusieurs milieux caractéristiques. Par exemple Chapman et al. (2002), ont utilisé le modèle de culture, comme une aide à la sélection des performances de différents génotypes de sorgho, variant par le degré d'expression de quatre gènes d'adaptation au déficit hydrique : efficacité de transpiration, précocité à floraison, capacité d'ajustement osmotique et durée de vie des feuilles. Ce couplage d'un modèle de culture, avec un outil de sélection, permet d'étudier l'effet de gènes associés à des caractères phénotypiques, sur des caractères d'intérêt tels que le rendement, sous l'influence de l'environnement (Chapman et al., 2003). Une seconde utilisation des modèles de culture, vise à analyser l'influence de caractéristiques génotypiques sur les caractères d'intérêt. Ainsi, les travaux d'Asseng et al. (2002) ont montré l'effet d'une variation isolée ou conjointe, de quatre caractères génotypiques (nombre de grains/unité de biomasse, durée de la phase végétative, vitesse de remplissage des grains et durée de remplissage des grains), sur le rendement d'une culture de blé, pour trois types d'environnements contrastés (très productif, moyennement productif et faiblement productif). En s'appuyant sur une analyse de sensibilité, cette étude a permis de montrer que l'effet des caractères génotypiques sur le rendement, est étroitement dépendant de l'environnement dans lequel il se situe. Une troisième utilisation des modèles de culture consiste à utiliser les variables simulées par le modèle comme un outil de prédiction de la stabilité des génotypes pour des variables d'intérêt. Ainsi, Mavromatis et al. (2001), dans une étude sur différents génotypes de soja, ont montré qu'il était possible, à l'aide d'un modèle de culture, de reproduire non seulement l'effet de l'interaction entre des caractéristiques

génomiques et l'environnement, mais également de classer correctement les différents génotypes sur les environnements testés et de mesurer l'interaction de façon similaire à ce qui se fait en expérimentation. Enfin, les modèles de culture peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision pour le choix variétal, cela est illustré par les travaux de Hammer et al. (1982) sur tournesol. Ces auteurs ont montré qu'il est possible, à partir de génotypes hypothétiques, de raisonner la date de semis en fonction des risques de froid, afin de minimiser les risques de pertes de rendement. Les dates de semis ont été raisonnées pour chacun des cultivars identifiés à partir de combinaisons de paramètres génomiques.

3.4.5 Lutte contre les ravageurs et les maladies

La quantification des impacts des ravageurs et des maladies des plantes sur les performances des cultures représente l'une des questions de recherche les plus importantes pour la modélisation de simulation agricole (Savary et al. 2006; Esker et al. 2012; Whish et al. 2015). Les agents pathogènes des plantes et les insectes qui se nourrissent des cultures, font partie intégrante des agroécosystèmes, où ils ont co-évolué avec les cultures pendant des millénaires (McCann et al. 2013). Une multitude d'interactions mutuelles et complexes existent entre les cultures cultivées et leurs ravageurs et maladies (Berger et al. 2007). Selon Donatelli et al. (2017), deux groupes principaux de processus peuvent être envisagés avec une approche modéliste. Un premier groupe de processus est lié à la dynamique des populations pathogènes, qui est simulée avec les modèles de la dynamique des ravageurs et des maladies, qui peuvent simuler l'étendue spatiale et temporelle de ces populations. Le deuxième groupe de processus traite des pertes des récoltes, et se concentre sur les conséquences des interactions hôte-pathogène sur les processus physiologiques des cultures et des rendements. Ces deux grands groupes de processus sont fortement sensibles aux facteurs physiques, biologiques, sociaux et économiques où les cultures sont cultivées (Zadoks et Schein, 1979). Ces deux domaines scientifiques: la dynamique des populations pathogènes et les pertes des récoltes qu'elles induisent, ont été récemment discutés par Cunniffe et coll. (2015), qui a identifié le lien entre les modèles épidémiologiques et les rendements et de services écosystémiques comme premier défi pour modéliser les maladies des plantes, en indiquant que les modèles, doivent intégrer réalisme épidémiologique suffisant, pour analyser et prévoir les effets de la dynamique de la maladie et de l'hôte sur le rendement.

3.4.6 Évaluation de l'impact du changement climatique sur les cultures et anticipation des stratégies d'adaptation

Le déroulement des activités agricoles et la sécurisation de la production dépendent principalement des facteurs climatiques, par exemple, la température, les précipitations et le vent

(Berry et al. 2006 ; Cattiaux et al. 2012). Dans les pays en développement, l'aggravation du CC a des impacts majeurs sur les moyens d'existence et la sécurité alimentaire des ménages pauvres vivants dans les zones rurales, qui dépendent largement de production agricole (Abid et al. 2016 ; Arunrat et al. 2020). Le CC menace la capacité des pays à garantir la sécurité alimentaire mondiale, à éliminer la pauvreté et à parvenir au développement durable (Charles et al., 2019). La pression sur les terres agricoles, les risques pour la sécurité alimentaire et la nécessité de s'adapter aux CC, nécessitent de plus en plus la modélisation des agro-écosystèmes futurs, pour une planification et prise de décision bien anticipée (Reddy, 2015). Plusieurs études ont utilisé des modèles de cultures pour évaluer l'impact des CC futurs sur la production agricole et l'anticipation d'une stratégie d'adaptation, à titre d'exemple Anser et al. (2020), ont simulé les rendements futurs de blé et de riz, sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 au Pakistan, en utilisant les modèles de culture APSIM et DSSAT. Ils ont aussi analysé l'impact économique de chaque mesure d'adaptation au CC futur projeté sur les rendements futurs de chaque culture, ces mesures consistent : à l'augmentation de densité de semis, recours aux cultivars améliorés, augmentation de l'utilisation d'azote et fertigation, ainsi ils ont déduit que ces mesures sont recommandées pour protéger les systèmes de culture dans la zone étudiée, et aident à protéger les moyens de subsistance des ménages ruraux et à réaliser leur sécurité alimentaire. Zhao et al. (2017) ont simulé avec le modèle AgMIP, les rendements futurs des quatre cultures les plus nutritives au monde (blé, riz, maïs et soja), sous les quatre scénarios RCP, ils ont constaté que sans une fertilisation au CO₂, une adaptation efficace et une amélioration génétique, chaque augmentation de la température moyenne mondiale de + 1°C réduirait, en moyenne, les rendements mondiaux de blé de - 6 %, de riz de - 3,2%, de maïs de - 7,4% et de soja de - 3,1%. Les résultats sont très hétérogènes selon les cultures et les zones géographiques, avec des estimations d'impact positives dans quelques régions. Chowdhury et al. (2016), ont simulé l'évolution des besoins en eau d'irrigation de blé en 2050 dans une région aride en Arabie Saoudite, ils ont déduit une augmentation des besoins en eau d'irrigation (BEI) de 58 millions m³, de 2011 à 2050. Ils ont aussi déduit, qu'en moyenne, une augmentation de + 1°C de la température, peut augmenter les BEI de + 2,9% dans cette région. L'augmentation des BEI était principalement due à l'augmentation de la température, tandis que l'effet des changements de précipitations était minime.

Luhunga (2017), a simulé le rendement futur du maïs, dans une région en Tanzanie, avec le modèle DSSAT. Ses résultats ont montré que, les rendements du maïs diminueraient dans les conditions climatiques futures de - 3,1 et - 5,3% sous RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement. Il a aussi prévu de fortes baisses du rendement du maïs de - 9,6% en 2070–2099 sous RCP 8.5, en comparaison aux rendements de la période de référence 1971-2000. Il a suggéré que la principale raison de la baisse

des rendements du maïs, dans les deux scénarios futurs, est due à l'augmentation des températures, qui raccourcira la durée de cycle de croissance du maïs. Cet auteur a recommandé de faire d'autres études de simulations de rendements futurs, pour trouver des variétés de maïs capables de résister aux impacts de l'augmentation des températures maximales et minimales.

Yao et al. (2011), ont précisé que la simulation avec des modèles de culture est un outil important pour étudier les effets présents et futurs de CC sur l'agriculture, en raison de la faiblesse du mécanisme dans un modèle statistique et ses limites dans l'extrapolation. Cependant, ils ont signalé qu'il y a aussi beaucoup d'incertitudes dans la simulation et évaluation du CC affectant l'agriculture, en termes de la prévision climatique, des modèles de cultures, de l'association des modèles climatiques avec des modèles de cultures et des incertitudes qui se produisent à travers le processus d'évaluation. Autrement, (Knutti., 2010 ; Rosenzweig et Wilbanks., 2010 ; Rötter et al., 2011), suggèrent, que ni les approches de modélisation, ni les outils de simulation des cultures, ne sont actuellement à la hauteur de la tâche, car la plupart des modèles de simulation de cultures ne tiennent pas en compte des stresses abiotiques et biotiques spécifiques aux cultures (par ex. les événements climatiques extrêmes, les ravageurs et les maladies).

Conclusion

Différents types de modèles tels que sont utilisés pour évaluer et prédire la croissance et le rendement des cultures. La communauté scientifique propose de nombreux modèles de cultures (statistiques, mécanistes, déterministes, stochastiques, dynamiques, statiques ...etc), avec différents niveaux de sophistication. Dans une telle gamme de modèles de cultures, les utilisateurs devraient avoir la possibilité de choisir le plus adapté, en termes de détail, d'échelle et de représentativité, à leurs objectifs. Cependant, même lorsqu'un choix approprié est fait, les limites du modèle doivent être clarifiées de manière à ce que les études de modélisation soient mises dans la bonne perspective et que des applications robustes soient réalisées. Ces modèles ont besoin de plus de travail pour l'amélioration de leur formalisme mathématique de base, pour réduire les incertitudes liées à leur simulation, en faisant appel à des résultats d'expérimentation sur le champ, pour une meilleure modélisation des processus physiologiques qui se déroulent dans la plantes en interaction avec des facteurs environnementaux biotiques et abiotiques.

Chapitre III : La production de blé dans le monde et en Algérie**1. Introduction**

La culture de blé joue un rôle stratégique dans l'équilibre de la balance économique de l'Algérie, vu les quantités massives de blé importées annuellement avec des factures très élevées, ce qui menace la sécurité alimentaire de pays. Ainsi ce chapitre est rédigé de manière à donner plus de connaissances sur l'historique de l'origine de blé dans le monde, sa morphologie et sa biologie. A l'échelle de l'Algérie, ce chapitre fait un zoom sur le zonage agropédclimatique des régions potentielles à la production de blé en pluviale, comme il apporte une analyse de la variabilité spatiale (par wilaya) et nationale des moyennes des superficies récoltées, des productions et des rendements de blés (blé dur et tendre), durant la période actuelle 1998-2019. Ce chapitre fait aussi une analyse des quantités de blés importées annuellement et leurs coûts financiers, payés par le trésor public.

2. Origine de blé

Il y a 10 000 ans, dans la région du Croissant fertile au Moyen-Orient et plus précisément au Sud-est de la Turquie, que sont apparues les premières cultures de blé (Peng et al., 2011). L'homme cultive les premières céréales issues des croisements spontanés entre graminées sauvages, parmi lesquelles l'engrain (*Triticum monococcum*) et l'amidonier (*Triticum turgidum dicoccum*). Un nouveau croisement spontané entre l'amidonier et une graminée sauvage, «*Aegilops squarrosa*», donne naissance à une nouvelle espèce, à l'origine du blé tendre, «*Triticum aestivum*». Parallèlement, l'amidonier donnera le blé dur, «*Triticum durum* » (Feldman, 2007). Selon Nalam et al. (2006), la propagation de la culture du blé de son site d'origine à travers le monde, a commencé par l'Europe de l'Anatolie vers la Grèce (8000 AJ), puis elle arrive au nord à travers les Balkans jusqu'au Danube (7000 AJ) et rentre à l'Italie, la France et l'Espagne (7000 AJ), atteignant enfin le Royaume-Uni et la Scandinavie aux environs 5000 AJ. De même, le blé s'est répandu via l'Iran en Asie centrale atteignant la Chine aux environs 3000 AJ et arrive à l'Afrique, d'abord via l'Égypte. Il a été introduit par les Espagnols au Mexique en 1529 et en Australie en 1788.

3. Les pays producteurs de blé dans le monde

Selon, CGIAR. (2020), le blé est cultivé chaque année sur 215 millions d'hectares, une superficie équivalente à celle du Groenland, ce qui le rend plus largement cultivé que toute autre culture vivrière de base. Près de 50 milliards de dollars américains de blé sont échangés chaque année

dans le monde. Le blé est consommé par 2,5 milliards de personnes dans 89 pays. Il remplace le maïs ou le riz en tant que source de protéines dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, et vient juste après le riz en tant que source de calories. Le blé est l'aliment de base dominant en Afrique du Nord et en Asie occidentale et centrale, fournissant jusqu'à la moitié de toutes les calories consommées dans la région. Cependant, les marchés de blé sont facilement déstabilisés par des conditions météorologiques extrêmes provoquant des pics de prix qui nuisent particulièrement aux pays pauvres. L'urbanisation et la hausse des revenus sont parmi les facteurs qui entraînent une augmentation rapide de la consommation mondiale de blé. Selon ce même rapport de CGIAR, les modèles prédisent que d'ici 2050, les consommateurs auront besoin de 60 % de blé de plus qu'aujourd'hui. Les défis sont grands: cette demande doit être satisfaite, sans que de nouvelles terres ne soient cultivées et avec une meilleure utilisation des engrais, de l'eau et de la main-d'œuvre (You et al., 2014). Selon les données de FAOSTAT. (2021), pour l'année 2019, les cinq premiers pays producteurs de blé dans le monde sont : la Chine, l'Inde, la Russie, les USA et la France, ces pays ont produit respectivement, 133.6, 103.6, 74.5 ; 52.3 et 40.6 millions de tonnes en 2019 (Figure. 21).

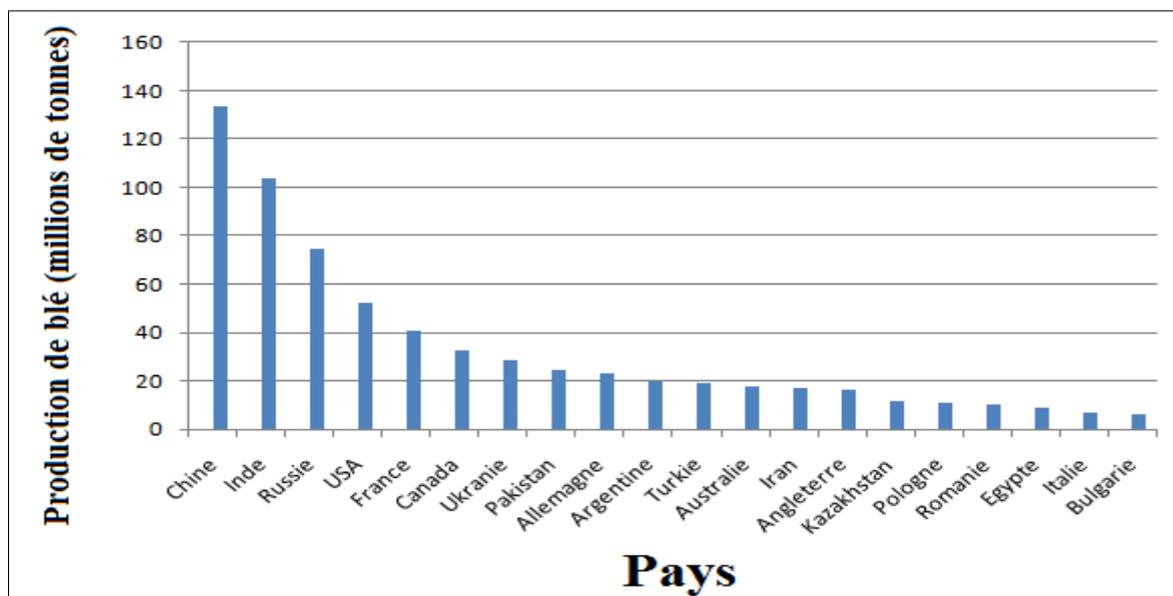


Figure 21. Répartition de la production mondiale du blé entre les 20 premiers pays producteurs de blé (source : FAOSTAT. 2021)

4. Cycle de croissance de blé

Le cycle de croissance de blé représente l'ensemble des modifications phénologiques qui se manifestent au cours du cycle de la culture. Les dates d'apparition des stades de développement

dépendent essentiellement des températures et des photopériodes accumulées par la culture depuis sa germination (Boufenar et Zaghouane, 2006).

Trois périodes repères caractérisent le développement du blé à savoir :

- La période végétative,
- La période reproductrice,
- La période de formation du grain et maturation (Figure.22).

4.1 La période végétative

Elle débute par le passage du grain de l'état de vie ralentie à l'état de vie active au cours de la germination qui se traduit par l'émergence de la radicule et des racines séminales et celle de la coléoptile (Boufenar et Zaghouane, 2006). Cette période se déroule en deux stades : stade germination et stade levée-tallage.

4.1.1 Stade de germination

Lors de la germination, les racines séminales poussent en premier, suivies de coléoptile, qui protège l'émergence de la première feuille. La longueur de coléoptile limite la profondeur de semis et sa longueur change avec le génotype, n'augmentant que légèrement lorsque les graines sont semées plus profondément (Kirby, 1993). Afin que la germination de la graine se déroule normalement, il faut que deux conditions se réalisent:

- 1) la graine soit capable de germer c'est-à-dire qu'elle est vivante et mûre.
- 2) le sol doit fournir à la graine l'eau et l'oxygène et la chaleur nécessaires pour sa germination

Selon Spilde (1989), la taille des graines n'altère pas la germination mais affecte la croissance, le développement et le rendement. Les graines volumineuses présentent plusieurs avantages par rapport aux petites graines, comme une croissance plus rapide des semis, un nombre plus élevé de talles fertiles par plante et un rendement en grains plus élevé. L'avantage des semences volumineuses est démontré lorsque le blé est cultivé sous des stress environnementaux, en particulier la sécheresse (Mian et Nafziger, 1994).

4.1.2. Stade levée-tallage

Boufenar et Zaghouane (2006), décrivent cette phase comme suit : dès que la première feuille a percé le coléoptile, ce dernier s'arrête de croître et se dessèche (stade levée). La première feuille fonctionnelle s'allonge, puis la deuxième, jusqu'à la quatrième toute en position alterne. Ensuite apparaît la première tige à l'aisselle de la première feuille de la tige principale. Ainsi le stade début de tallage est atteint. Pendant cette phase, des talles apparaissent d'une façon synchrone. Le tallage se caractérise par l'entrée en croissance de bourgeons différenciés à l'aisselle des feuilles.

La zone de sortie des talles est appelée plateau de tallage. L'aptitude à émettre une ou plusieurs talles est une caractéristique variétale mais fortement dépendante des conditions du milieu : température, eau, azote et des techniques culturales. D'après Masle (1980), une alimentation azotée limitante pour la plante se manifeste simultanément par l'interruption du processus de tallage herbacé et par une réduction de la croissance des talles existantes.

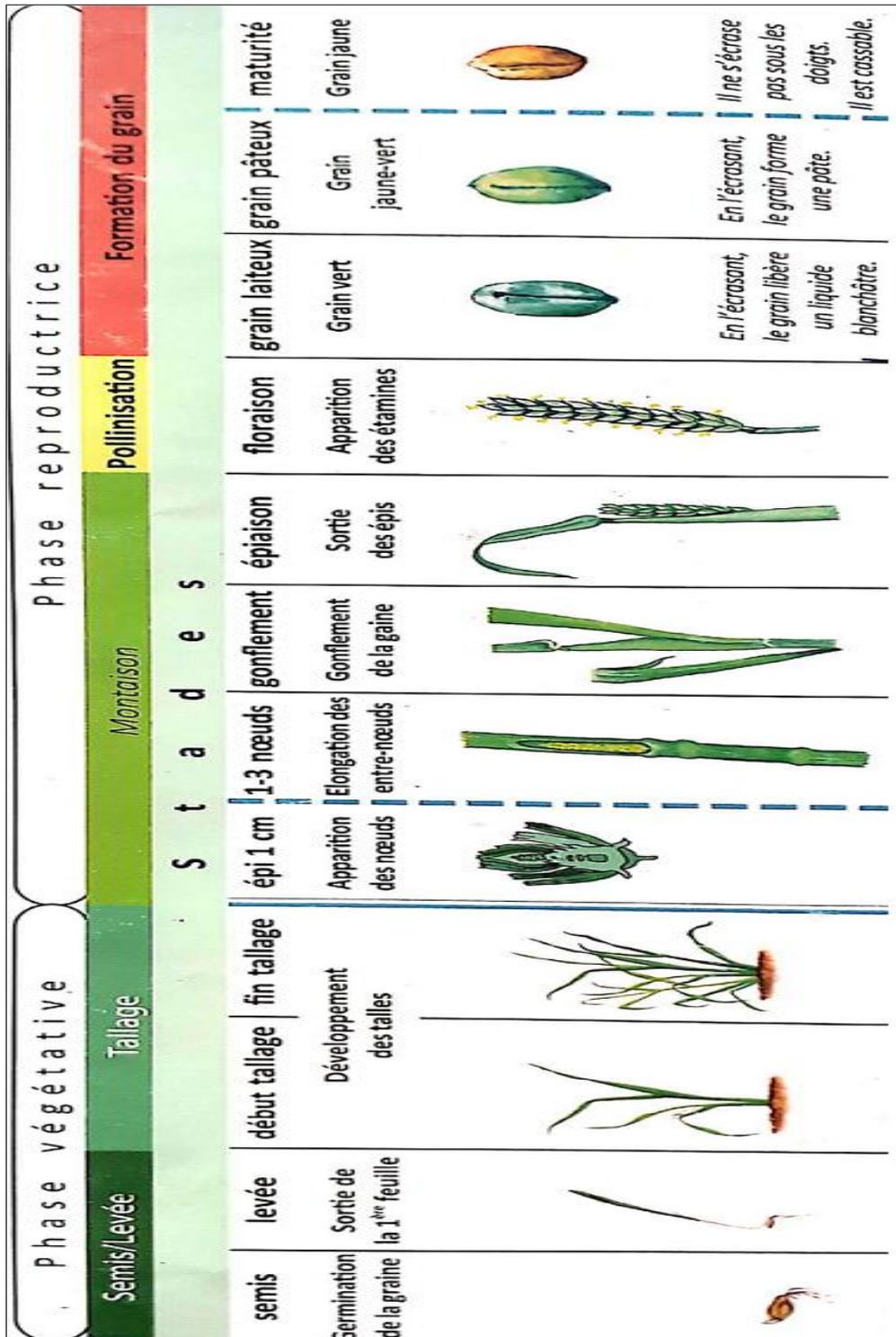


Figure 22. Cycle de croissance du blé (source : Boufnar et Zaghouane, 2006)

Les talles ne produisent pas toutes des épis de blé et nombreuses talles avortent avant l'anthèse (Gallagher et Biscoe, 1978). Le nombre de talles productives dépend du génotype et de l'environnement et est fortement influencé par la densité de semis. Le tallage a une grande importance agronomique dans les céréales car il peut compenser partiellement ou totalement les différences de nombre de plants après l'installation de la culture et peut permettre la récupération des cultures après les gelées précoces. La durée du stade végétatif chez le blé peut varier de 60 à 150 jours selon la date de semis et le génotype. Elle dépend du taux d'apparition des feuilles (ou phyllochron qui correspond à l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'émergence séquentielle de feuilles successives sur la tige principale d'une plante) et du moment de la différenciation florale (double crête), qui sont induites par la photopériode (le rapport entre la durée du jour et de la nuit) et la vernalisation (une période de froid subie par une plante nécessaire pour la faire passer du stade végétatif au stade reproductif) (Acevedo et al. 2009).

4.2 La période reproductrice

Cette période commence quand une jeune inflorescence (apex) d'environ 1 cm est observée au-dessus du plateau de tallage. Cette période de développement de blé peut être divisée en deux stades : stade montaison- gonflement et le stade d'épiaison-fécondation (Boufenar et Zaghouane 2006).

4.2.1 Stade montaison-gonflement

Le début de stade montaison se caractérise par la différenciation et l'élongation des ébauches des nœuds et des entre nœuds. Cette phase est marquée par un agrandissement de la demande en eau, lumière et l'azote, tandis que la durée de cette phase est très peu variable : 28-30 jours (Grandcourt et al., 1975 ; Gate, 1995). Cette phase est suivie par une différenciation des pièces florales : glumelles (inférieures puis supérieures), organes sexuels (étamines et stigmates) et en parallèle, la tige et l'inflorescence s'allongent. Les apex des talles se différencient des ébauches d'épillets puis des pièces florales et montent. C'est le stade tallage en épis. A partir de la montaison, les besoins en azote deviennent très importants et déterminent le nombre d'épis, le nombre de grain par épi et le poids maximal du grain (Hebert, 1975). Ensuite l'inflorescence monte en grossissant dans les gaines des différentes feuilles. Ainsi, la gaine de la dernière feuille s'allonge et se gonfle : c'est le stade gonflement.

4.2.2 Le stade épiaison et floraison

Peu de temps après le gonflement de la gaine, un épi se forme au sommet de chaque tige, la différenciation des épillets se produit à l'intérieur de l'épi, les fleurs apparaissent. La précocité de l'épiaison est un caractère agronomique très recherché dans les zones semi-arides car il permet

d'éviter aux cultures céréalières les sécheresses de fin de cycle (Boufenar et Zaghouane, 2006). L'épiaison est courte mais se prolonge si la température est basse. Le nombre de grains diminue fortement lorsque le stress hydrique survient pendant la période de croissance des épis (Hochman, 1982). L'épi de blé est formé de deux rangées d'épillets situés de part et d'autre de l'axe. Un épillet regroupe trois fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et est entourée de deux glumelles (pièces écailleuses non colorées). Elle contient trois étamines (pièces mâles), un ovaire surmonté de deux styles plumeux (les pièces femelles). La fleur du blé est dite cléistogame, c'est-à-dire que, le plus souvent, le pollen est relâché avant que les étamines ne sortent de la fleur. Il s'attache alors au stigma, où peut se produire la fécondation. Après la fécondation, un certain nombre de grains se forment sur chaque épillet, chaque grain est enveloppé dans des glumelles (Kirby et al., 2002) (Figure.23). Un déficit hydrique affecte la croissance des épis, alors qu'à la floraison, il peut provoquer l'avortement des épis et inhiber le remplissage des grains d'où un grand risque d'échaudage (Chadouli et Djane-Hamed, 2015).

4.3 La période de remplissage et maturation des grains

Le stade de remplissage du grain se distingue par la multiplication cellulaire suivie par l'accumulation des réserves (amidon et protéines) dans les cellules du grain. C'est une étape déterminante pour le poids de mille grains et la teneur en protéines du grain (Chambenoit, 1999). La phase de remplissage des grains correspond à l'accumulation dans ceux-ci des produits issus de la photosynthèse qui, provisoirement, s'étaient auparavant accumulés dans la tige, les racines. Selon (Lindsey et al. 2017 ; DUN et CPS, 2018), au cours de son remplissage, le grain passe par différents stades :

- ✓ **Le stade laiteux** : le grain a atteint sa forme et ses dimensions définitives. Il est de couleur jaune pâle et son contenu est laiteux.
- ✓ **Le stade pâteux** : le grain est jaune pâle, il s'écrase facilement, son humidité est comprise entre 50 et 60%. La teneur en matière sèche de la plante est alors voisine de 25%, les feuilles et les spathes sont verts.
- ✓ **Le stade pâteux-dur** : le grain est jaune, il commence à durcir, il se raye encore à l'ongle, son humidité est comprise entre 45 et 50%. La teneur en matière sèche de la plante entière est de 30% environ, les feuilles de la base et les spathes commencent à se dessécher.
- ✓ **Le stade vitreux** : le grain est dur, il ne se raye plus à l'ongle, son humidité est inférieure à 40%. La teneur en matière sèche de la plante entière est supérieure à 35%, les feuilles au-dessous de l'épi et les spathes sont secs.
- ✓ **La maturité complète** : le grain a une humidité inférieure à 35%, la teneur en matière sèche de la plante est supérieure à 45%. La plante est entièrement sèche.

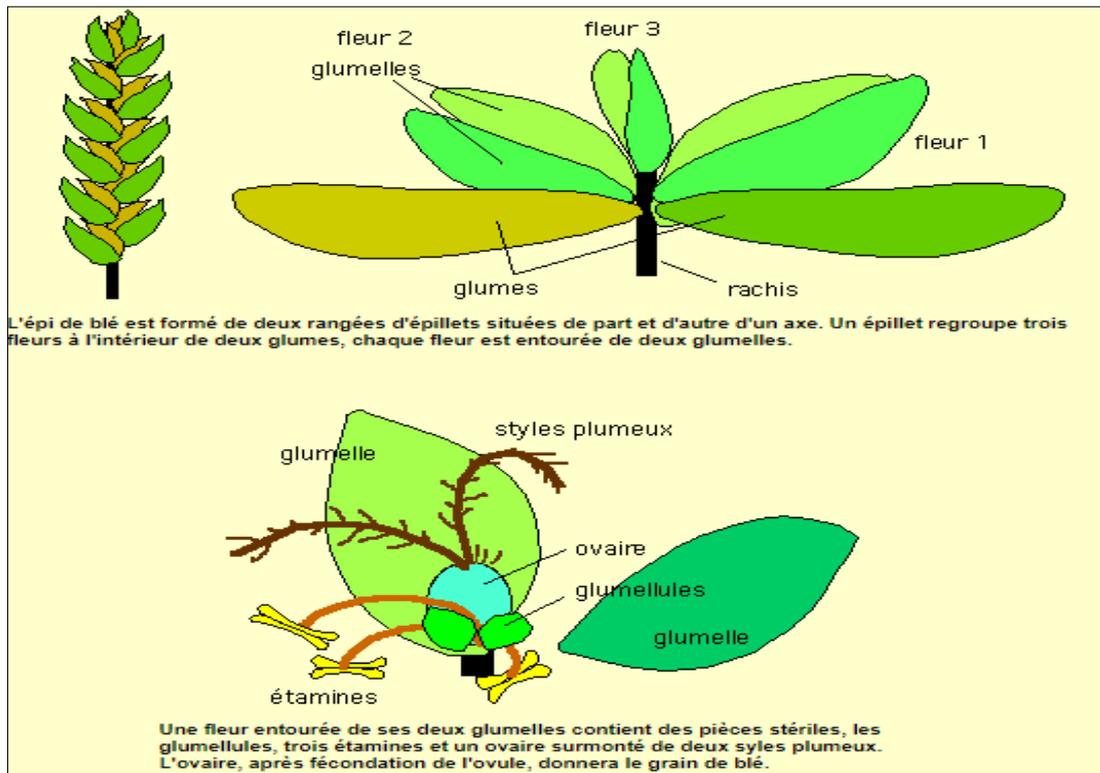


Figure 23. Détail de composition de l'épi et de la fleur de blé (source : Mosiniak et al., 2006)

5. Exigences du blé

5.1. Exigences édaphiques

Le blé exige une bonne préparation de sol qui devrait être meublée et stable, résistante à la dégradation par les pluies d'hiver pour éviter l'asphyxie de la culture et permettre une bonne nitrification au printemps. La profondeur de sol doit être de 12 à 15 cm pour les terres battantes (limoneuses en générale) ou 20 à 25 cm pour les autres terres, une richesse suffisante en colloïdes de sol permet d'assurer une nutrition adéquate pour aboutir à des bons rendements (Soltner, 1990). Selon ce même auteur, particulièrement, les sols de texture argilo-calcaire, argilo-limoneux, argilo-sableux ne présentant pas de risques d'excès d'eau pendant l'hiver. Les séquences de travail du sol à adopter doivent tenir compte du précédent cultural, de la texture du sol, et de la pente. Le pH optimal se situe entre 6 à 8. La culture de blé est modérément tolérante à l'alcalinité du sol.

5.2. Exigences climatiques

5.2.1. Température

Une température supérieure à 0°C (le zéro de végétation) est exigée pour la germination, cependant l'optimum de croissance se situe entre 20 et 26°C. Une diminution de la température

pendant l'hiver est nécessaire à certaines variétés dite d'hiver, cette exigence conditionne la montaison et la mise à fleur (Clement et Prats, 1970). La majorité des variétés de blé peuvent supporter un gel modéré pendant l'hiver si la plante est suffisamment développée. Cependant, le blé ne supporte pas les fortes températures en fin de cycle pendant le remplissage du grain. En effet, la température conditionne à tout moment la physiologie du blé. Une élévation brusque des températures associée à un déficit hydrique durant le stade remplissage de grain provoque un dessèchement de la feuille étandard qui provoque le ralentissement de la migration des réserves vers le grain et un grand risque d'échaudage (Boufenar et Zaghouane, 2006).

5.2.2. L'eau

L'eau joue un rôle important dans la croissance de la plante (Soltner, 1990). Au stade de germination, la teneur minimale en eau requise dans le grain du blé est de 35 à 45 % de son poids (Evans et al., 1975). En effet, c'est durant la phase épi 1cm à la floraison que les besoins en eau sont les plus importants. La période critique en eau se situe entre 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison (Loue, 1982).

5.2.3. La lumière

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le développement de blé. En effet, un bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement (Soltner, 1990). Une certaine durée du jour (photopériodisme) est nécessaire pour la floraison et le développement des plants de blé.

6. Zone de production de blé en Algérie

En Algérie, la céréaliculture occupe un vaste territoire constitué de plaines, des hauts plateaux et de chaînes de montagnes, ce territoire est caractérisé par un climat très variable qui va du subhumide à l'aride supérieur, avec une présence remarquable dans la frange pluviométrique des 300-400 mm (Feliachi, 2000; Cadi, 2005). Les conditions pédoclimatiques démarquent quatre zones distinctes.

- ✓ Une zone potentielle, située essentiellement dans les plaines littorales et sub-littorales et le nord des hauts plateaux. Le cumul pluviométrique annuel reçu est compris entre 450 et 800 mm. La céréaliculture est pratiquée de manière intensive. La superficie occupée par la céréale varie de 1 à 1.2 millions d'hectares (Cadi et al. 2000).
- ✓ Une zone intermédiaire, localisée principalement au sud des hauts plateaux, le cumul pluviométrique annuel est inférieur à 400 mm, elle correspond à la zone agropastorale où se

pratique une céréaliculture de subsistance avec des rendements très bas. La superficie de cette zone est estimée à 1.8 millions d'hectares.

- ✓ Une zone steppique, où la céréaliculture est pratiquée de manière irrégulière sur 0.3 à 0.8 millions d'hectares, selon les années. C'est une zone à hiver froid, les précipitations enregistrées sont faibles, présentant une grande variabilité interannuelle, de 200 à 300 mm. C'est une zone peu productive, axée essentiellement sur la production de l'orge.
- ✓ La zone sud, où se pratique une céréaliculture sous irrigation

Les trois premières zones sont indiquées dans la Figure.24.

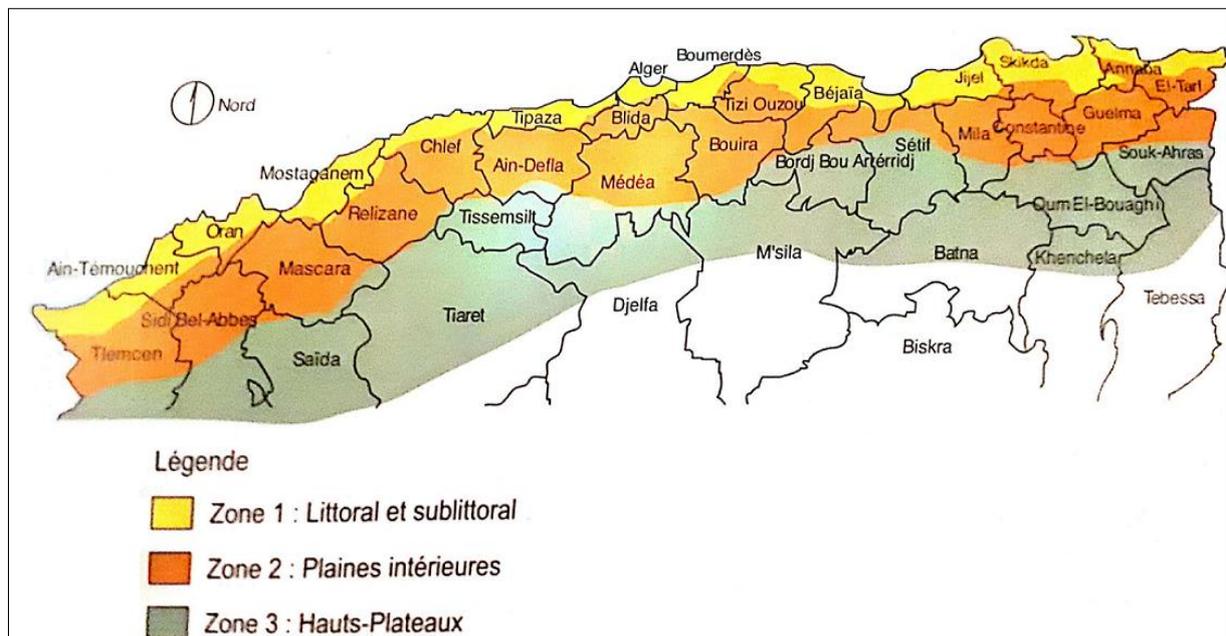


Figure 24. Les zones potentielles de production de culture pluviale blé dans le Nord de l'Algérie (Source : Cadi et al., 2000).

6.1 La distribution des superficies et des productions des blés (dur et tendre) par wilaya durant la période 1998/2019

La Figure. 25, montre la variabilité des moyennes de 22 ans période 1998-2019, des superficies récoltées, des productions et des rendements de blé dur (BD) et tendre (BT) au niveau des 48 wilayas du pays, selon les données statistiques fournies par MADR. (2020). Le graphe (a) de la Figure.25, montre la variabilité des moyennes (de 20 ans) des superficies récoltées par wilaya de BD ($SRBD_w$) et de BT ($SRBT_w$) durant la période 1998-2019, ainsi ce graphe montre que la wilaya de Tiaret présente le pic de la $SRBD_w$ et de la $SRBT_w$ qui avoisine 37 900 et 31 850 ha, respectivement. D'une manière générale, les superficies récoltées en blés (tendre et dure) sont très importantes dans les wilayas situées dans les HPO tel que Sétif, Souk Ahras, Constantine, Khenchla, Tebessa, Batna, Oum El Bouaghi...et les wilayas des plaines de centre telles que Medea, les plaines occidentales telles que Chlef et les Hautes plaines occidentales telles que Relizane et Tiaret. Les $SRBT_w$ restent inférieures à celles de $SRBD_w$ sauf dans les wilayas de Saida, Sidi Bel Abes et Mascara où la $SRBT_w$ est supérieure à $SRBD_w$.

Le graphe (b) de la Figure.25, présente la production moyenne par wilaya de BD (PBD_w) et celle de BT (PBT_w), durant la période 1998-2019. Ainsi, il est indiqué sur ce graphe, que la distribution de la production suit celle des superficies récoltées. Les pics de la PBD_w et de PBT_w sont observés dans la wilaya de Tiaret, ils sont estimés à 1.3 millions de qx (MQ) et à 743 730 qx, respectivement. Les meilleurs PBD_w sont observées dans les wilayas de l'Est de pays surtout celles situées dans les HPO tels que Sétif, Guelma et Souk Ahras.

Le graphe (c) de la Figure.25, montre la variabilité des rendements moyens de BD et de BT par wilaya, désignés par RBD_w et RBT_w , respectivement sur ce graphe, ces rendements observés durant la période 1998-2019. Ce graphe montre que les meilleurs rendements de blés sont enregistrés dans les wilayas du Sud, cela s'explique par le faite que la culture de blé est menée en irrigation complète au Sud. Alors que pour la majorité des wilayas de Nord, la culture de blé est menée en pluviale. Ainsi le meilleur RBD_w est observé dans la wilaya de Ghardaïa et estimé à 40.5 qx/ha, tandis que le meilleur RBT_w est observé dans la wilaya d'El Oued estimé à 35.8 qx/ha. Les autres wilayas du Sud y ont aussi des bons rendements : Adrar, Biskra, Ouargla et Illizi. Les RBD_w et RBT_w se rapprochent presque sur toutes les wilayas du pays sauf dans les wilayas du Sud (Ghardaïa, Adrar et Ouargla), où le RBD_w est meilleur que le rendement de RBT_w .

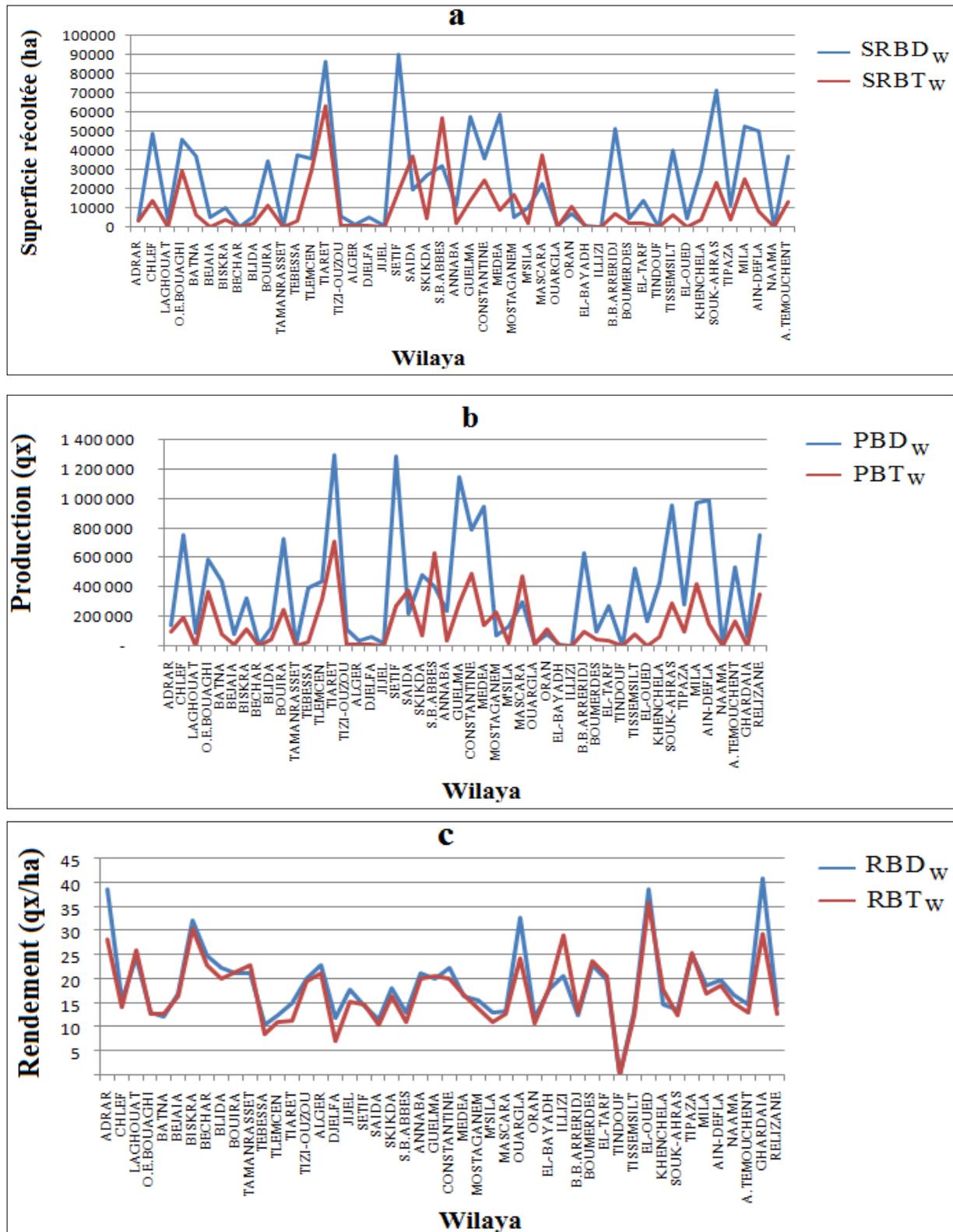


Figure 25. Variabilité des superficies récoltées, des productions et des rendements de blé dur et tendre entre les 48 wilayas.

7. Évolution des superficies et de la production de blé dur et tendre en Algérie

Les graphes de la Figure. 26, représente l'évolution par année des superficies nationales totales récoltées en BD et BT durant la période 1998-2019, désignées respectivement, par $SRBD_N$ et $SRBT_N$ et l'évolution de la production totale nationale de BD et BT, désignées respectivement, par PBD_N et PBT_N . Ainsi, l'analyse de ces graphes indique que la $SRBD_N$ est supérieure à la $SRBT_N$ et que la PBD_N est supérieure à la PBT_N . Les moyennes de $SRBD_N$ et $SRBT_N$, durant la période 1998-2019, sont 1.2 et 0.53 Millions ha (MH) et les moyennes de PBD_N et PBT_N sont 18 et 7 Millions d'hectares (MH). La PBD_N a connu une légère tendance à la hausse à partir de 2009, en revanche la PBT_N a connu une tendance à la baisse à partir de 2003, cela peut être due à l'importance de la part du BD par rapport au BT dans les habitudes alimentaires du peuple algérien, et aussi au rôle qu'a pu joué les incitations de l'Etat aux agriculteurs à travers le PNDA et la politique du renouveau agricole (Bourihane et Mekkaoui, 2013).

Les efforts du gouvernement algérien pour augmenter la production céréalière en utilisant davantage de semences certifiées, d'engrais et de soutien technique aux agriculteurs se sont avérés efficaces, ce qui a entraîné une augmentation de la production céréalière (blé, orge et avoine) de 2.97 à 6.05 millions de tonnes entre la décennie 1999-2008 et en fin de la décennie 2009-2019. Cependant, la production nationale en céréales reste bien en deçà des besoins nationaux en céréales estimés à huit millions de tonnes. La forte dépendance de la céréaliculture des conditions climatiques surtout les précipitations est la première cause de la baisse de sa production. Ainsi un programme d'irrigation des céréales est lancé par le MADR. En effet, sur un objectif d'irrigation de 600 000 ha, uniquement 250 000 ha sont réalisés, ce qui reste minimales (Hales. 2019). D'une manière générale, la PBD_N et la PBT_N est très variable, d'une année à une autre, leurs courbe évoluent en forme de dent de scie, cette forte variabilité et faiblesse de la production de blés est liée aux conditions climatiques, surtout à la faiblesse et forte variabilité des précipitations et à leur mauvaise répartition au cours de cycle de la culture de blé (Djermoun. 2009).

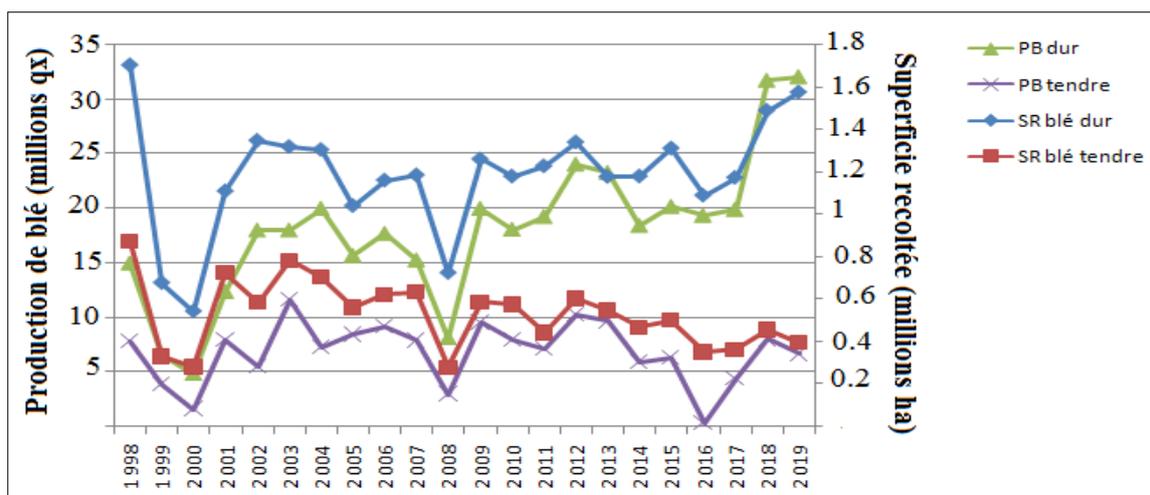


Figure 26. Évolution des superficies récoltées et des productions du blé dur et blé tendre durant la période 1998/2019 en Algérie

Le graphe de la Figure. 27, présente l'évolution des superficies totales nationales récoltées en blés désignée par SRB_N (somme des $SRBD_N$ et $SRBT_N$), en millions d'ha (MH) et de leurs productions (PB_N) (somme des PBD_N et PBT_N en millions de qx (MQ), en Algérie, durant la période 1998-2019 et selon les données fournies par MADR. (2020). Ainsi, il est indiqué sur le graphe de la Figure. 27, que la moyenne de la SRB_N est 1.7 MH, tandis que la moyenne de PB_N est 25 MQ. Ce graphe montre aussi, que durant l'année 1998, la SRB_N est 2.6 MH, elle correspond à la plus grande superficie récoltée en blés, durant toute la période 1998-2019, cependant la PB_N était estimée à 22.8 MQ, durant cette même année, et qui ne correspond pas à la valeur maximale de PB_N observée, au cours de cette même période, en revanche la PB_N maximale est enregistrée durant l'année 2018, elle est estimée à 39.8 MQ. La PB_N la plus faible durant la période 1998-2019 est enregistrée durant l'année 2000, elle est estimée à 6.5 MQ récoltée sur une superficie de 826 570 MH. Ainsi, cette Figure.27, montre que l'évolution des productions de blé ne dépend pas uniquement des superficies récoltées, mais d'autres facteurs, ainsi, El Watan, (2018), a rapporté que la bonne production de blés enregistrée durant l'année 2018, s'explique par : i) l'utilisations d'un volume de 2.7 millions de quintaux de semences certifiée, ii) l'apport d'un volume de 1.9 million de quintaux d'engrais, iii) les conditions climatiques, favorables pour le démarrage des travaux de préparation du sol, ainsi qu' à la mise en place des cultures et par iii) une bonne répartition de la pluviométrie au cours de cycle de blés sur l'ensemble des zones céréalières qui a permis un bon développement végétatif de la culture de blé, principalement durant la saison printanière qui s'est distinguée par un excédent pluviométrique.

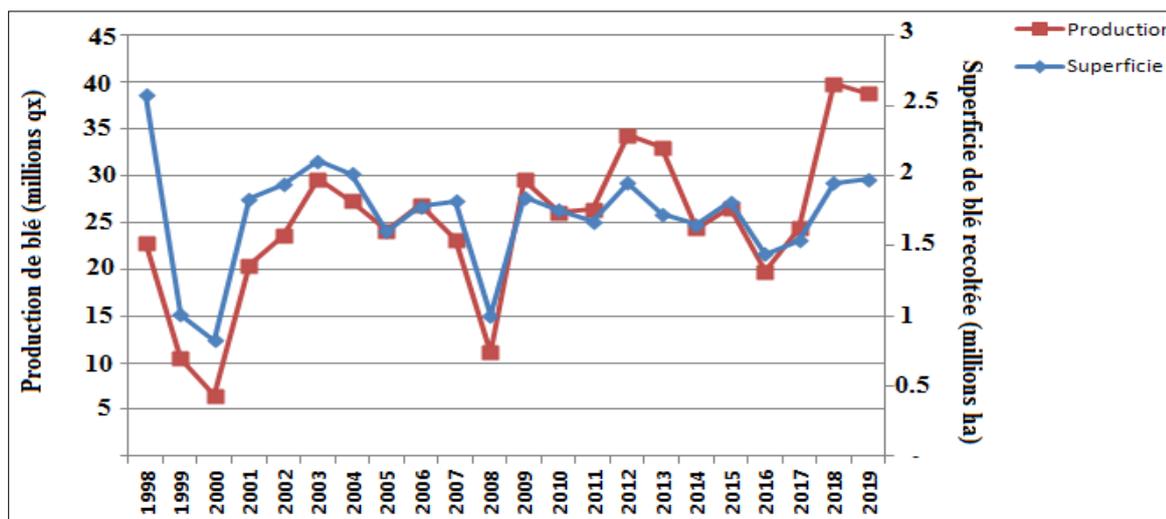


Figure 27. Évolution des superficies récoltées et des productions totales (somme blé dur et blé tendre) durant la période 1998/2019 en Algérie

8. Évolution du rendement moyen national de blés (dur et tendre) durant la période 1998-2019

La Figure. 28, montre des graphes de l'évolution du rendement moyen national de BD et BT, désignés respectivement, par RDB_N et RBT_N , durant la période 1998-2019, selon les données fournies par MADR. (2020). L'analyse de ces deux graphes, montre que les RBT_N sont caractérisés par une forte variabilité interannuelle que ceux de RDB_N . Les moyennes de RDB_N et RBT_N observées, durant la période 1998-2019 sont respectivement 17.3 et 16.1 qx/ha. D'une manière générale, les RDB_N et RBT_N présentent une tendance croissante, en revanche, les rendements de RDB_N sont légèrement meilleurs surtout, durant les périodes 2000-2004 et 2012-2019. Les meilleurs RDB_N et RBT_N sont 21.3 et 17.7 qx/ha, observés respectivement, durant les années 2018 et 2013. Les plus faibles RDB_N et RBT_N sont 8.8 et 5.8 qx/ha, enregistrés durant les années 1998 et 2000 respectivement.

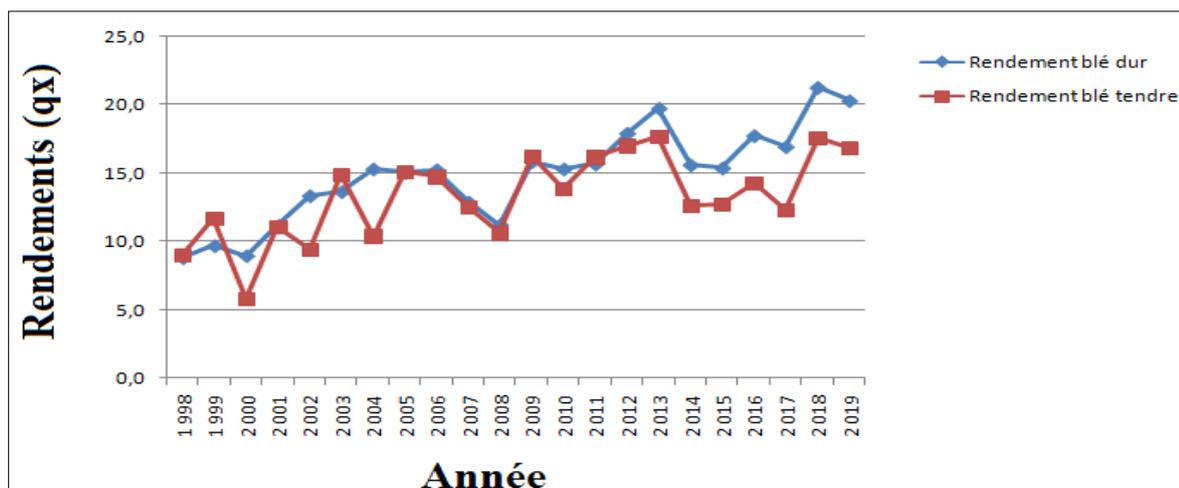


Figure 28. Évolution des rendements moyens des blés (durs et tendres) durant la période 1998-2019 à l'échelle nationale

9. Évolution de l'importation de blé en Algérie durant la période 2000-2019

La Figure. 29 présente des courbes de l'évolution des quantités de BD et BT et d'évolution des quantités totales des blés (somme des quantités de BD et BT), importées annuellement ainsi que leurs factures d'importation durant la période 2000-2019, selon les données statistiques fournies par MADR. (2020). L'analyse des graphes de la Figure. 29 montre que les quantités de BT importées sont supérieures à celle de BD, ainsi en moyenne, durant la période 2000-2019, l'Algérie a importé annuellement 43.4 MQ de BT avec une facture moyenne de 1.03 milliard de dollars (Milliards de \$), contre une quantité moyenne de BD importée estimée à 21.6 MQ avec une facture moyenne annuelle de 634.5 millions (millions de \$). L'importation des blés (somme BD et BT ensemble) coûte au trésor public annuellement une facture d'environ 1.7 Milliards de \$, durant la période 2000-2019. La quantité maximale de BD importée est 41.3 MQ enregistrée durant l'année 2000. Comme il est indiqué dans la Figure.27, la PBD_N durant l'année 2000 est estimée à 4.8 MQ, ce qui explique l'importation massive de BD durant cette année. Cependant, la quantité de BT importée durant cette dernière année est estimée à 12.2 MQ, elle correspond à la quantité minimale de BT importée durant la période 2000/2019. La quantité maximale de BT importée est de 71.9 MQ, durant l'année 2018. La quantité minimale de BD importée, au cours de ces 22 ans, est 10.9 MQ, durant l'année 2013.

Selon Bessaoud et al. (2019), les importations de blé en Algérie ont été multipliées par 10 entre les années 1966-1969 (698 500 tonnes) et 2000-2005 (6 796 000 tonnes), ainsi depuis le milieu de la décennie 2000, l'Algérie figure parmi les 6 pays, dont les importations sont supérieures à 5 millions de tonnes/an. Elle est le troisième importateur au monde de BD et le premier

importateur mondial de BT (50 % des échanges mondiaux). Ainsi, la couverture des besoins nationaux en BT et BD est assurée respectivement à 78 % et à 45 % par des importations. En revanche, Hales, (2019), rapporte qu'une tendance à la baisse des importations des céréales est observée durant l'année 2019, encouragée par une bonne production nationale en particulier pour l'orge et le BD. Cette tendance à la baisse devrait se poursuivre avec la récente mesure prise par le gouvernement pour limiter également les achats de BT, qui consiste à imposer une limite d'importation de 4 millions de tonnes de BT par an, contre 6 millions de tonnes généralement importés auparavant.

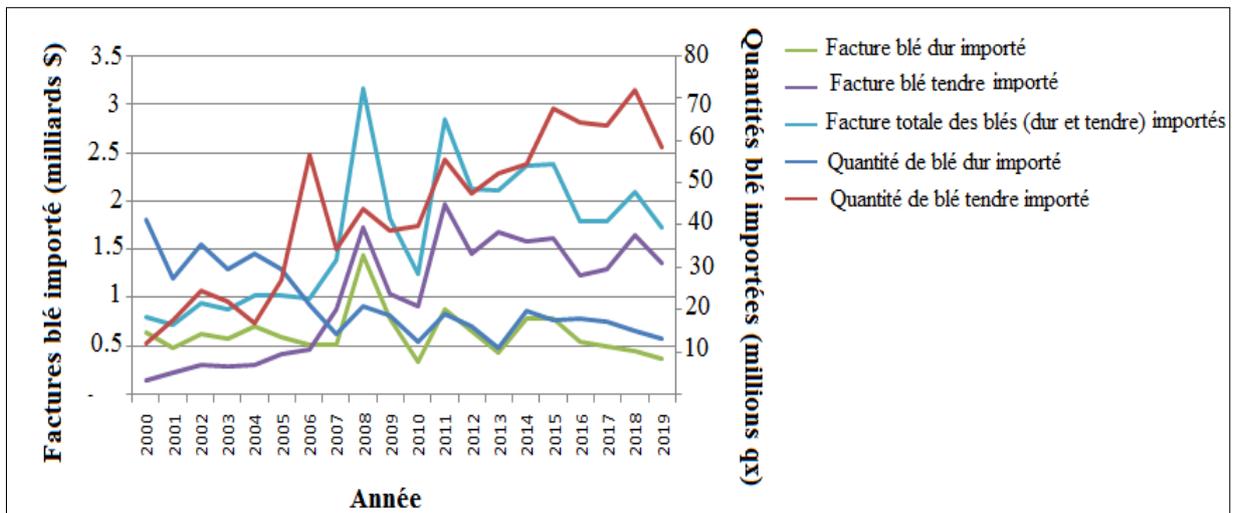


Figure 29. Évolution des quantités du blé dur et tendre importées de l'Algérie et leurs factures d'importation durant la période 1998/2019

La Figure.30, représente un histogramme des variations des moyennes de trois années (2017, 2018 et 2019), des quantités totales du blés (somme BD et BT) importées par l'Algérie de chacun des quatre principaux pays (parmi d'autre pays) fournisseurs du blés importés, selon les données statistiques fournies par MADR.(2020). La Figure.30 comporte aussi une courbe de variation des moyennes des factures d'achat des blés par l'Algérie, de chacun de ces quatre pays, durant la période 2017-2019. Ainsi, il ressort que le premier pays fournisseurs du blé à l'Algérie au cours de la période 2017-2019, est la France, qui a exporté à l'Algérie en moyenne 4.4 millions de tonnes du blé avec une facture moyenne de 1.2 Milliards de \$. Suivi par l'Argentine, le Canada et les USA.

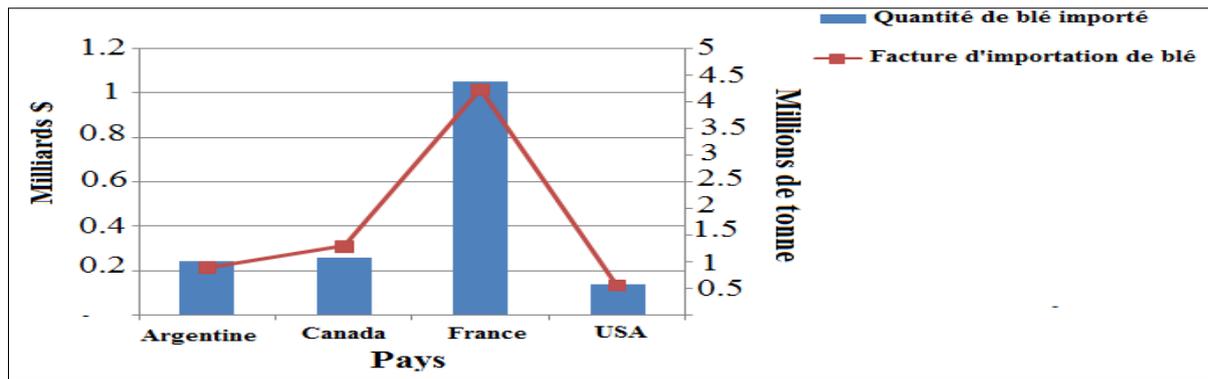
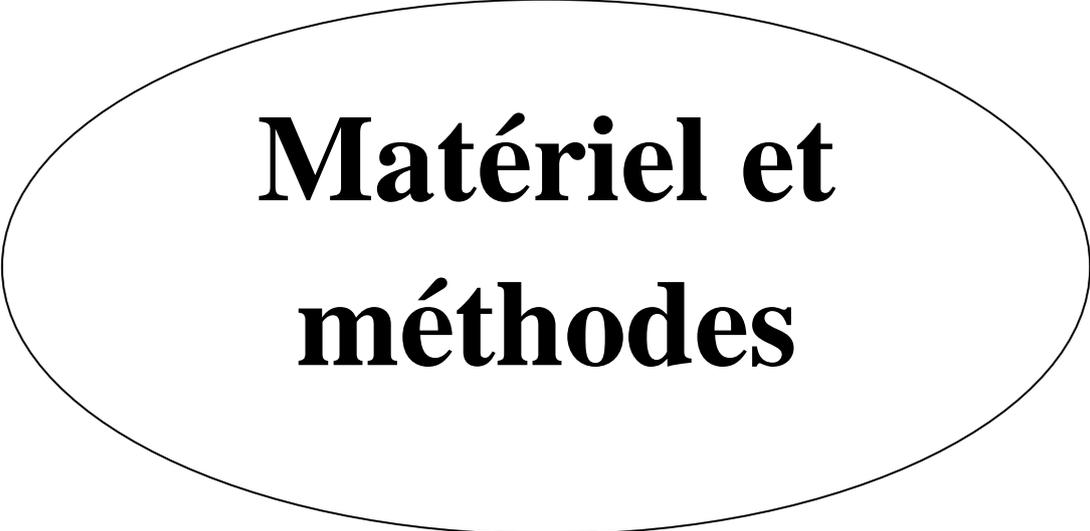


Figure 30. Variabilité des quantités et factures moyennes des blés importés durant la période 2017-2019

Conclusion

Dans ce chapitre, il a été montré l'importance de la culture de blé dans le monde vu sa valeur nutritive, son importance stratégique dans le maintien de la sécurité alimentaire des pays pauvres et le profit économique colossal, qu'elle procure aux pays qui exportent leur production de blé. En Algérie, les besoins de la population en blé sont satisfaits avec des importations massives, vu la médiocrité des rendements nationaux, induits par les conditions climatiques surtout des précipitations, et par le manque d'incitations financières et d'accompagnement technique aux agriculteurs, qui pratiquent souvent une culture pluviale de blé, sans aucun apport en eau d'irrigation d'appoint et en fertilisant et sans choix des variétés adaptées aux conditions édaphiques et climatiques, de chaque région de pays. Des efforts sont fournis par le gouvernement pour améliorer les rendements de blé à travers les différentes politiques agricoles pour l'intensification de la céréaliculture, cependant, leur apport sur le terrain est en dessous des objectifs tracés. Ainsi la nécessité d'un travail acharné pour améliorer les rendements de blé s'impose pour maintenir la sécurité alimentaire de pays d'une manière durable, cela peut se concrétiser par l'amélioration des programmes de soutien aux céréaliculteurs et leur accompagnement technique surtout, pour le choix des variétés locales certifiées les plus adaptés à la sécheresse, le choix des dates de semis et les recours à l'irrigation d'appoint si les ressources en eau sont disponibles.



**Matériel et
méthodes**

Chapitre IV: Matériel et Méthodes

1. Introduction

Dans ce chapitre est présenté l'ensemble du matériel et méthodes utilisé pour l'aboutissement de ce travail de recherche. Ce chapitre est entamé par une description géographique et climatique des deux sites étudiés : Sétif et Bordj Bou Arreridj (BBA). Ensuite, sont énumérées les sources des données climatiques observées et celles projetées, ainsi que la méthode de correction de ces dernières. Ultérieurement, une présentation du modèle de culture, utilisé pour la simulation des rendements d'un cultivar de BD est faite, en donnant une brève explication du formalisme mathématique appliqué pour sa conception, ainsi que, la description des données nécessaires pour déroulement, tout en expliquant son mode de fonctionnement. Par la suite, un éclaircissement simplifié de la méthode de calibration et de validation de ce modèle est réalisée dans ce chapitre. Enfin, ce dernier, se termine par la définition des indices statistiques utilisés soit pour la vérification de la fiabilité des sorties de ce modèle ou bien, pour la détermination des corrélations statistiques existantes, entre les rendements du BD simulés et quelques paramètres climatiques étudiés.

2. Description de la zone d'étude

2.1 Situation géographique et milieu naturel

Les Hautes Plaines Orientales (HPO) d'Algérie sont situées entre les latitudes 35–36,5° Nord et les longitudes 4,5–8,3°Est (Figure.31), elles sont caractérisées par des altitudes qui varient entre 900 à 1200 m. Elles sont naturellement limitées au Nord et à l'Ouest par les chaînes de montagnes de l'Est de l'Atlas Tellien, au Sud par le Chott Hodna et les chaînes de montagnes orientales du l'Atlas saharien et à l'Est par la Tunisie (Kourat et Medjerrab 2016). Dans ce travail de recherche, l'étude de l'impact de CC sur le BD au niveau des HPO semi-arides, est établie, au niveau de deux sites expérimentaux, situés dans deux wilayas potentielles pour la production de blé dur en pluvial, il s'agit de Sétif et de Bordj Bou Arreridj (BBA). Le choix de la localisation des deux sites de Sétif et BBA, pour cette étude est justifié par la disponibilité des données de sol, de climat (pour Sétif et BBA), et la disponibilité des données phénologiques de cultivar de BD appelé "Mexicali" au site de Sétif.

La wilaya de Sétif est limitée par les wilayas suivantes: au Nord par Jijel, à l'Est par Mila, au Sud par Batna et M'sila et à l'Ouest par Bordj-Bou-Arreridj. Le chef-lieu de la wilaya est situé à 300 km à l'Est de la capitale, Alger. La wilaya s'étend sur une superficie de 6.550 km². La wilaya de Sétif avec son découpage naturel est décomposée en 3 grandes zones : une zone montagneuse au Nord représentée par la chaîne des Babors qui s'étend sur une centaine de

kilomètres couvrant pratiquement le Nord de la wilaya où se rencontrent des sommets élevés dont la montagne de Babors 2.004 m ; une zone des hautes plaines : elle occupe la région centrale de la wilaya, dont l'altitude varie entre 800 et 1300 mètres. Au niveau de cette zone émerge des collines et des bourrelets montagneux ; une lisière au Sud renfermant des cuvettes où se dispersent les chotts: Chott El Beida près de Hammam Sokhna, Chott El Frein près d'Ain Lahdjar et Chott El Melloul près de Guellal (ANDI. 2013.a).

La wilaya de BBA occupe une place stratégique au sein de l'Est algérien. Elle se trouve à mi parcours du trajet séparant Alger de Constantine. Le Chef lieu de la wilaya est située à 220 km à l'Est de la capitale, Alger. Elle s'étend sur une superficie de 3 921 km². La wilaya de BBA est limitée par les wilayas : de Bejaia au Nord, Sétif à l'Est, M'Sila au Sud et par Bouira à l'Ouest. L'altitude à BBA varie entre 302 m et 1 885 m. Le milieu naturel de BBA se caractérise par la succession de trois zones géographiques : une zone montagneuse au nord avec la chaîne des Bibans ; une zone des Hautes plaines qui constitue la majeure partie de la région et une zone steppique, au sud-ouest, à vocation agropastorale (ANDI. 2013 b).

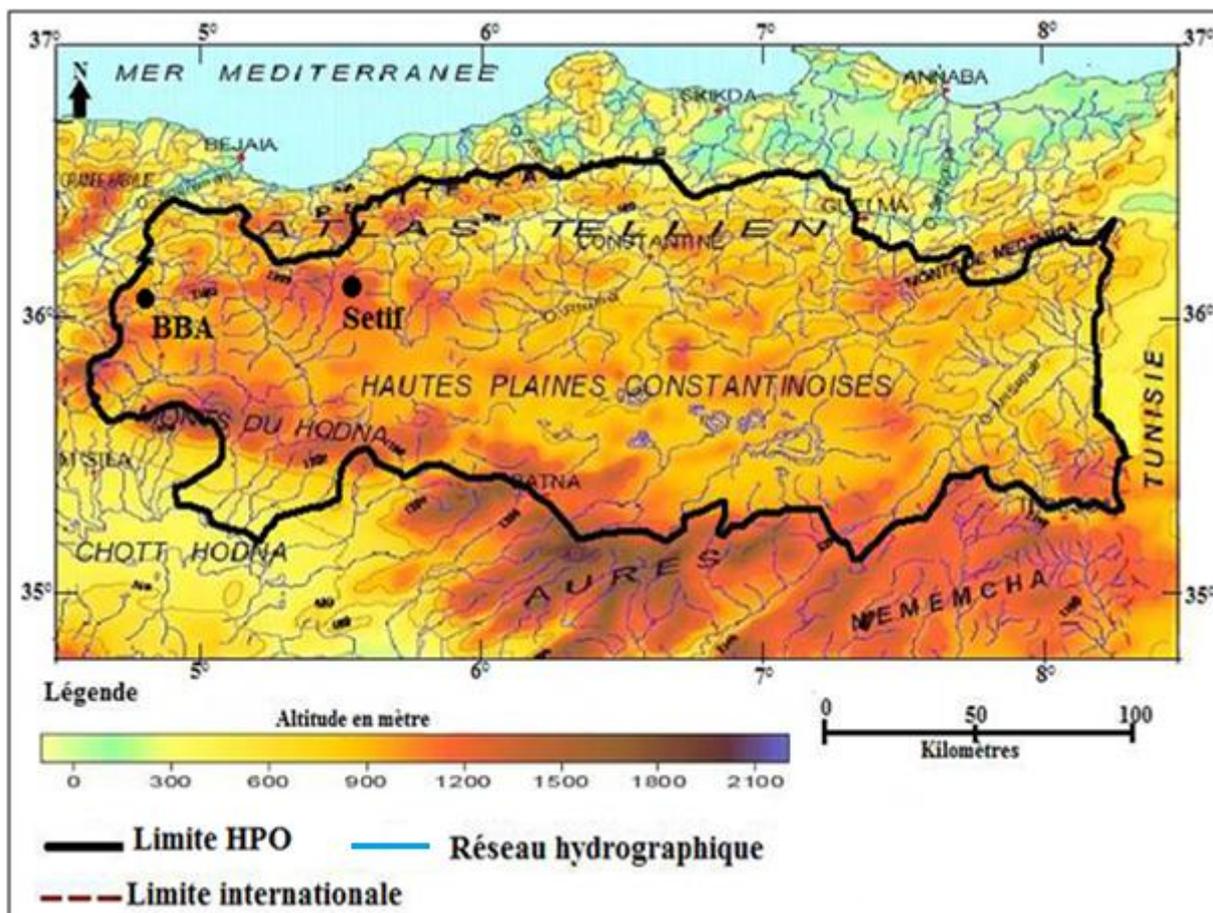


Figure 31. Situation géographique de la zone d'étude (source. Kourat. 2015)

2.2 Le climat de la région des Hautes plaines orientales

Les moyennes annuelles des précipitations dans les HPO peuvent atteindre 500 mm au Nord et diminuer jusqu'à 300 mm au Sud, et peuvent même atteindre moins 200 mm dans les zones des lacs salés selon la carte des précipitations établies par l'ANRH en 1993. Au cours de la période 1995–2009, dans les HPO, la température maximale se situe entre 32 et 37°C, tandis que la température minimale varie entre 0 et 5°C (Kourat, 2015). Le climat continental et la haute altitude ont rendu les HPO bien adaptées aux cultures céréalières pluviales. Cependant, la forte variabilité des précipitations annuelles entraîne des rendements extrêmement variables d'une année à une autre.

3. Sources des données climatiques

3.1 Données climatiques observées

Les données journalières observées durant la période 1981-2013, des températures maximales et minimales (T_{max} et T_{min} °C), des précipitations (P en mm), de vent (V en m/s), de l'humidité relative (Hr en %) et de la durée d'insolation (S en heure) sont issues des stations professionnelles de l'Office National de la Météorologie (ONM) de Sétif et de BBA. La station de Sétif est située dans le bassin versant de Soummam, cependant la station de BBA est située dans le bassin versant de Hodna, les coordonnées géographiques et l'altitude de ces deux stations sont indiquées dans le Tableau.2.

Tableau 2. Coordonnées géographiques et altitude des deux stations météorologiques de Sétif et BBA.

<i>Station</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Altitude (m)</i>
Sétif	36.16°N	5.31°E	1015
BBA	36.06°N	4.66°E	957

3.2 Les données climatiques futures

Les données climatiques futures de P , de T_{max} , T_{min} , de rayonnement net (R_n), de Hr et de la V sont issues de l'expérience de réduction d'échelle régionale coordonnée (ou Coordinated Regional Climate Downscaling) (CORDEX) de domaine Europe, elles sont téléchargeables à partir du site <https://euro-cordex.net/060378/index.php.en>. Dans cette étude, les données climatiques futures globales sont simulées sous deux scénarios de forçage radiatif RCP 4.5 et RCP 8.5 (van Vuuren et al. 2011), durant les deux périodes futures 2035-2064 (future proche) et 2065-2094 (future lointain), ensuite ces données globales sont réduites avec une méthode de descente d'échelle dynamique sur une grille d'une résolution très fine de 0,11 ° (~ 11 km), en utilisant un Modèle de Circulation Régional (MCR) : KNMI forcé par un Modèle de Circulation Globale (MCG) : ICHEC. Le choix de cette combinaison GCM/RCM: ICHEC_KNMI est justifié par sa meilleure

simulation des données climatiques de la période de référence (PR) 1981-2010 en Algérie (Arbadi et al., 2018).

3.2.1 Correction des biais des projections climatiques futures

Les données climatiques futures brutes (réduites d'échelle) sont corrigées de leurs erreurs de simulation (ou biais) en utilisant la méthode des deltas, le principe de base de cette méthode est l'addition et/ ou la multiplication des anomalies des données futures simulées aux et/ ou par des données journalières observées, durant la PR, (Teutschbein et Seibert., 2012).

Pour les températures, dans cette étude les anomalies correspondent à la différence entre les moyennes mensuelles des températures brutes simulées par le modèle ICHEC_KNMI, pour les deux périodes futures 2035-2064 et 2065-2094, sous RCP 4.5 et RCP 8.5, et les moyennes mensuelles des températures simulées pour la PR 1981-2010 selon la formule 1. Pour les pluies, leurs anomalies correspondent aux rapports entre les moyennes mensuelles des pluies brutes simulées pour les deux périodes futures 2035-2064 et 2065-2094 et les moyennes mensuelles des pluies simulées pour la PR 1981-2010, selon l'équation 2.

$$T_{F\text{ cor}}^*(j) = T_{\text{obs}}(j) + \mu_m(T_{F\text{ brute}}(j)) - \mu_m(T_{\text{Ref}}(j)) \dots \dots \dots \text{(Eq.1)}$$

$$P_{F\text{ cor}}^*(j) = P_{\text{obs}}(j) \cdot \frac{\mu_m(P_{F\text{ brute}}(j))}{\mu_m(P_{\text{Ref}}(j))} \dots \dots \dots \text{(Eq. 2)}.$$

Avec :

$T_{F\text{ cor}}^*(j)$ et $P_{F\text{ cor}}^*(j)$: sont respectivement les températures et les précipitations journalières corrigées de leurs biais ;

$T_{\text{obs}}(j)$ et $P_{\text{obs}}(j)$: sont respectivement les températures et les pluies journalières observées durant la PR 1981-2010 ;

$\mu_m(T_{\text{Ref}}(j))$ et $\mu_m(P_{\text{Ref}}(j))$: sont respectivement les moyennes mensuelles des températures et des précipitations journalières simulées pour la PR 1981-2010 ;

$\mu_m(T_{F\text{ brute}}(j))$ et $\mu_m(P_{F\text{ brute}}(j))$: sont respectivement les moyennes mensuelles des données journalières brutes des températures et des pluies durant les deux périodes futures 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les résultats de (Tramblay et al., 2013; Foughali et al., 2015), indiquent que les méthodes de correction des biais telles que la méthode de cartographie quantile, largement utilisée dans les études d'impact hydrologique, peuvent être difficiles à valider dans les climats semi-arides en raison du nombre limité de jours de pluie, en particulier pendant l'été, et l'importante de la variabilité interannuelle des précipitations, typique du climat méditerranéen. Dans le cas d'un

changement vers des conditions plus sèches ou des périodes de temps différentes, les méthodes dites quantiles-quantiles, peuvent ne pas être en mesure de corriger le biais du modèle avec une précision suffisante, en particulier pour les précipitations. En revanche, Trambly et al. (2013), suggèrent que la méthode des deltas ne repose pas sur l'hypothèse stationnaire de biais du modèle et ne modifient pas les résultats du modèle climatique. Par conséquent, elles peuvent être considérées comme plus robustes et devraient être préférées dans les cas où d'autres approches ne peuvent pas être validées de manière satisfaisante. Ainsi ces résultats justifient le choix de la méthode des deltas pour la correction des biais des données climatiques futures simulée par le modèle ICHEC_KNMI.

4. Le modèle Aquacrop

4.1 Description de modèle Aquacrop

AquaCrop est un modèle de productivité de l'eau de culture développé par la division des terres et des eaux de la FAO de Rome en Italie, pour résoudre les problèmes de sécurité alimentaire et évaluer l'effet de l'environnement et de la gestion de champs sur la production agricole (www.fao.org/aquacrop/overview/fr/). Ce modèle simule la réponse du rendement des cultures herbacées à l'eau, il est particulièrement bien adapté aux conditions, dans lesquelles l'eau est un facteur limitant dans la production agricole (Latief et Syed, 2018). AquaCrop réunit la précision, la simplicité et la robustesse, il est très utilisé dans le monde vu le nombre limité d'input nécessaires à son déroulement, en plus il exige des paramètres explicites et des données d'entrée principalement intuitives qui peuvent être déterminées à l'aide des méthodes simples (Steduto et al. 2009). Dans l'approche AquaCrop, et selon (Greaves et Wang. 2016), la transpiration journalière (T_{ri}) est convertie en production de biomasse aérienne quotidienne (B_i) à travers l'évapotranspiration de référence journalière ET_0 et de la productivité en eau des cultures normalisée (WP^*) à la fois pour la demande évaporative et le CO_2 atmosphérique, comme indiqué dans l'équation (3) :

$$B_i = WP^* \left[\frac{T_{ri}}{ET_{0oi}} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

Sur AquaCrop, afin que l'équation (Eq.3) ci-dessus, soit fonctionnelle, elle a été placée dans un modèle comprenant des composantes précises telles que : le sol, avec son bilan en eau, la culture avec ses processus de développement, de croissance et d'élaboration du rendement et l'atmosphère avec son régime thermique, la pluviométrie, la demande évaporative et la $[CO_2]$. Les relations fonctionnelles entre ces différents composants du modèle sont schématisées dans la Figure. 32

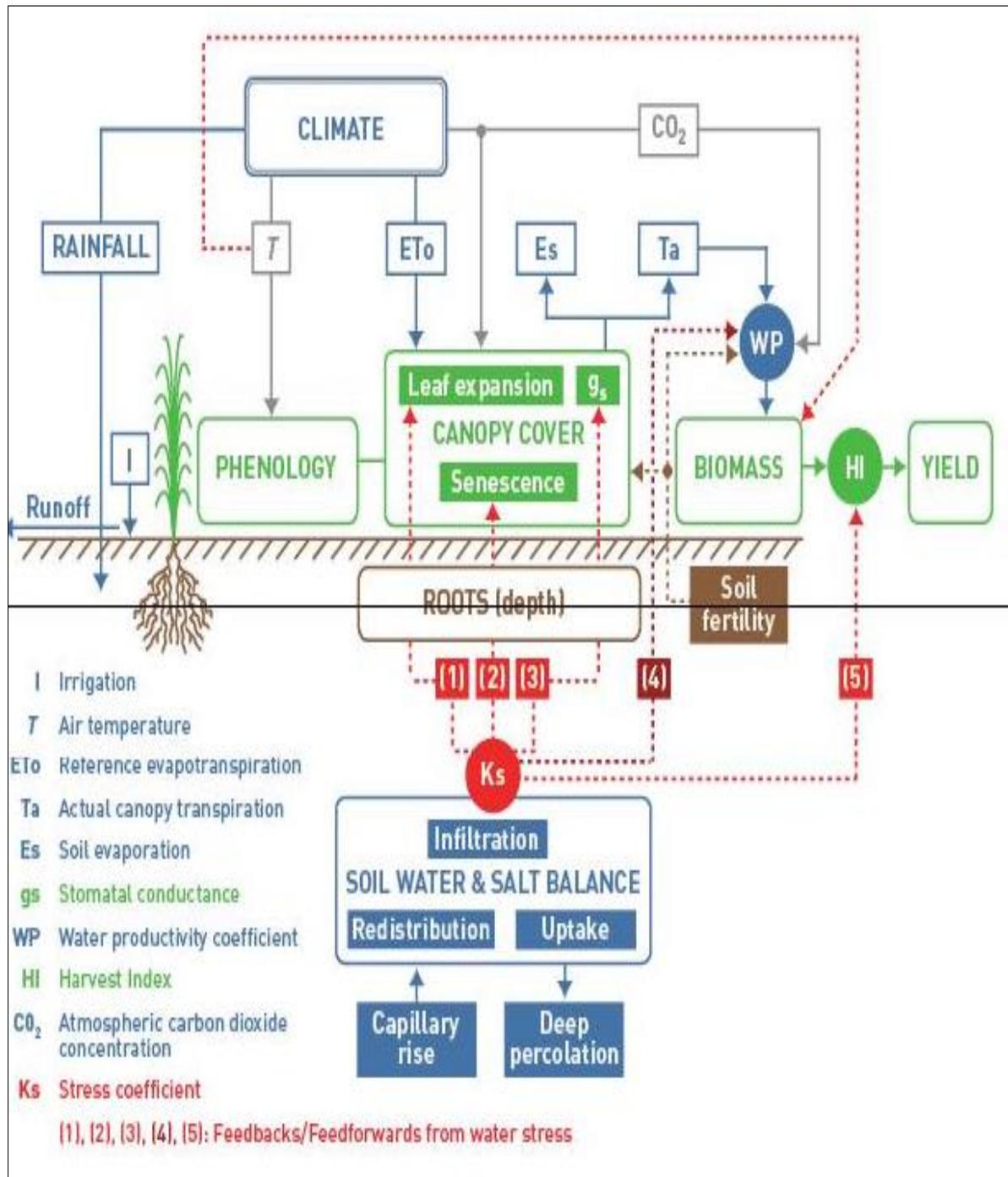


Figure 32. Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante (Steduto et al. 2008).

En plus, quelques aspects de gestion de la parcelle ont été pris en considération (ex. irrigation, fertilisation, etc.), vu qu'ils ont un impact sur le bilan d'eau du sol, le développement de la culture, et par conséquent ils ont des effets sur la production finale (FAO, 2016). AquaCrop peut

aussi simuler la croissance des cultures sous des scénarios de changement climatique (en considérant des scénarios à différentes [CO₂]. AquaCrop ne prend pas en compte les impacts négatifs des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes sur les rendements (Raes, 2014).

Avant de tourner AquaCrop, il y'a lieu de distinguer deux types de paramètres d'entrée : les paramètres conservatifs et les paramètres non conservatifs. Les premier type sont des paramètres fixes qui ne varient ni avec le temps ni en fonction de la situation géographique, comme les paramètres de résistances au stress ou de la productivité de l'eau. Le modèle fournit des valeurs par défaut pour ces paramètres. Sinon, ils doivent être calibrés. En revanche, le second type, sont des paramètres qui changent en fonction des pratiques culturales, comme la densité de semis ou les dates d'apparition des stades phénologiques. Ces paramètres doivent être fournis au modèle (Steduto et al., 2012). Dans cette étude, la version 5.0 du logiciel AquaCrop a été utilisée.

Les études où AquaCrop est appliquée sont très nombreuses à travers le monde, parmi lesquelles il ya lieu de citer celle de Baiamonte et al. (2020), qui ont simulé avec AquaCrop l'effet de la biochar sur les BEI des trois cultures (tomate, blé et sorgho) cultivées dans le sable du désert des Émirats Arabes Unis, ils ont déduit que cette méthode est une stratégie pour augmenter la rétention de l'eau et donc économiser l'eau d'irrigation et / ou réduire les effets du stress dû à la sécheresse sur ces cultures. Adeboye et al. (2020) ont utilisé AquaCrop et ils ont conclu que le stress azotique diminuait de - 48 % et de - 43 les rendements en grain et l'efficacité de l'utilisation de l'eau de soja, respectivement, au Zimbabwe. Saha et Mondal. (2016), ont évalué à l'aide de ce modèle aussi, les impacts de CC sur les cultures de riz et du tournesol de saison sèche, dans une région côtière du Bangladesh. Ils ont déduit la performance du modèle dans la simulation du rendement des cultures dans les conditions salines. Ces deux auteurs ont déduit que les rendements futurs du riz et du tournesol devraient augmenter dans les conditions climatiques futures projetées. Alshikh et al. (2017) ont montré qu'au Soudan avec des simulations faites avec AquaCrop, les rendements du sorgho durant la période 1973- 2013 sont améliorés avec des semis précoces car ils permettent à cette culture de tirer profit des premières averses de pluie.

4.2 Données d'entrée de modèle Aquacrop

4.2.1 Données climatiques

4.2.1.1 Données climatiques observées

Pour simuler le rendement de BD avec AquaCrop pour la PR 1981-2010 à BBA et pour les deux périodes : 1981-2010 et 2010-2013 (cette dernière période correspond à la période de validation d'AquaCrop sur la ferme expérimentale de Sétif) à Sétif, les données climatiques journalières de T_{min}, T_{max}, de P et de l'ET₀, observées durant les périodes ci-dessus, aux stations météorologiques de l'ONM de Sétif et de BBA, sont injectées dans le modèle AquaCrop. Les

données de l' ET_0 sont calculées préalablement par le logiciel ET_0 calculator, pour que ce dernier fasse les calculs de l' ET_0 , durant ces deux périodes (1981-2010 et 2010-2013) et pour la période 1981-2010 à Sétif et BBA respectivement, il a fallu injecter dans le logiciel ET_0 calculator, les données journalières observées de Tmax, Tmin, P, Hr, S, et de la V, les détails de ces calculs de l' ET_0 sont expliqués ultérieurement. La $[CO_2]$ est aussi exigée par AquaCrop pour simuler les rendements, ainsi les moyennes annuelles globales de $[CO_2]$ issues de l'observatoire de Mauna loa à Hawaï, sont disponibles sur le package d'AquaCrop et utilisées pour tourner ce modèle.

4.2.1.2 Données climatiques futures

Pour simuler les rendements futurs pour les deux horizons 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, les données des projections climatiques journalières (corrigées de leurs biais) de Tmin, Tmax et de P, durant ces deux horizons futurs et sous ces deux scénarios RCP, sont introduites dans AquaCrop, alors que les données des projections climatiques journalières (corrigées de leurs biais) de Tmax, Tmin, Hr, S et de V pour les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, sous ces deux scénarios RCP, sont injectées dans l' ET_0 calculator pour calculer l' ET_0 journalière. Ainsi les données journalières de l' ET_0 calculées par l' ET_0 calculator, pour ces deux périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5, sont par la suite introduites dans le modèle AquaCrop. Les données des moyennes annuelles des $[CO_2]$ projetées pour les deux périodes futures 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5 sont jointes au package de logiciel AquaCrop.

4.2.1.3 Données de l' ET_0 calculator

ET_0 calculator est un logiciel développé par la division des terres et des eaux de la FAO, dont la principale fonction est de calculer l' ET_0 à l'aide de la formule de Penman-Monteith (Eq.7). Cette formule estime l'évapotranspiration d'une surface caractérisée par une végétation courte et verdoyante (gazon), convenablement arrosée en eau, de hauteur uniforme (0.12 m), d'un albédo de 0.23 et d'une résistance de surface (au transfert de vapeur d'eau) de 70 s/m (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{[0.408 \Delta \times (R_N - G)] + \left[\gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) \times u_2 (e_s - e_a) \right]}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{Eq.7})$$

Où :

ET_0 : évapotranspiration de référence (en mm/jour),

R_n : le rayonnement global (en $Mj/m^2/jour$),

e_s : la pression de vapeur saturante (en $kPa/^\circ C$),

γ : la constante psychométrique en $\text{kPa}/^\circ\text{C}$) et 900 est une constante pour un pas un temps journalier.

T : la température moyenne journalière de l'air à une hauteur de 2 m (en $^\circ\text{C}$),

u_2 : la vitesse de vent à une hauteur de 2 m (en m/s),

L'ET₀ calculator requiert des données climatiques de Tmax, Tmin, Hr, V et de S à une échelle de temps définie par l'utilisateur (Raes, 2012). Les données de Rn utilisées pour le calcul de l'ET₀ dans le logiciel ET₀ calculator sont calculées par ce dernier, selon une formule d'Engström qui nécessite les valeurs de longitude et altitude des deux stations de Sétif et BBA et les valeurs de S observées et simulées pour ces deux stations. Dans cette étude, l'ET₀ calculator a été exécuté sur une échelle de temps journalière. Les sorties de l'ET₀ journalière calculées par ce modèle sont par la suite introduites comme inputs dans le modèle AquaCrop pour simuler le rendement du BD.

4.2.1.4 Données sol

Le modèle Sol-Plante-Air-Eau (SPAW) est généralement utilisé pour calculer les bilans hydrologiques quotidiens des parcelles agricoles (Saxton et Willey, 2009). Les valeurs de la teneur des horizons du sol en matière organique, argile et sable, obtenues par des analyses au laboratoire, ont été introduites dans le modèle SPAW qui, à son tour, simule le point de flétrissement permanent (PWP), la capacité au champ (FC), la quantité totale d'eau disponible contenue dans le sol (TAW) et la conductivité hydraulique saturée (SAT), grâce à une fonction de pédotransfert. Les valeurs de PWP, FC et SAT sont indispensables pour le déroulement de modèle AquaCrop (Kaly et al. 2016).

Les valeurs des profondeurs des sols des deux sites expérimentaux de Sétif et BBA et leurs teneurs en sable, argile, limon et matière organique et leur pH sont issues des analyses au laboratoire ainsi que les valeurs de PWP, FC, SAT et TAW qui sont simulées par le modèle SPAW, sont indiquées dans le Tableau. 3.

Tableau 3. Caractéristiques physiques des sols des deux sites expérimentaux de Sétif et de BBA estimées au laboratoire et simulées par le modèle SPAW

Station	Les horizons de sol	Données issues d'analyse au laboratoire					Données simulées par SPAW			
		Sable (%)	Argile (%)	Limon (%)	Matière Organique (%)	pH	PWP	FC	SAT	TAW
							%	%	%	mm/m
Sétif	Horizon 1 (0-40 cm)	12	33	56	2.5	7.82	20.5	37.4	50.6	169
	Horizon 2 (40-60 cm)	24.8	41	32.7	2.5		25	38.6	49	136
BBA	Horizon 1 (0-30 cm)	7.16	51.8	41	1.24	6.9	30.4	43.4	53	130
	Horizon 2 (20-30 cm)	14	57	27	1.24		33.3	45.1	52.9	118

4.3 Calibration de modèle AquaCrop

Dans cette étude, le modèle AquaCrop est calibré pour le cultivar de BD appelé "Mexicali", en utilisant les données phénologiques observées dans des conditions d'expérimentation au champ réalisée par Khebbat. (2015), pendant la campagne: 2010-2011 au niveau de la ferme expérimentale de Sétif appartenant à l'Institut National de Recherches Agronomiques (INRA), située à 36,15° de latitude Nord et à 5,37 ° de longitude Est, et sur une altitude de 970 m, ces données phénologiques sont indiquées sur le Tableau. 4.

Les paramètres considérés non conservatifs selon les auteurs du modèle sont conditionnés plutôt par l'environnement de la culture ainsi que par les pratiques culturales. Ces paramètres concernent la densité de semis, les durées des phases de : levée, de couverture foliaire maximale, de la profondeur maximale des racines, de la période de la floraison, de la formation des graines et de la maturité. Les durées de ces différentes phases de développement ont été paramétrées durant la campagne 2010/2011 en jour et en degré jour. En revanche les valeurs des paramètres non conservatifs énumérés sur le Tableau. 4 sont calibrées de façon à obtenir des valeurs de rendements et de biomasse simulées proches de celles observées, dans l'expérimentation durant l'année agricole 2010-2011. Aussi, les données climatiques journalières de Tmax, Tmin, ET₀ (calculées par ET₀ calculator) durant l'année 2010-2011 et les données de sol (Tableau.3) de site d'expérimentation à Sétif, sont ensuite injectées dans le model AquaCrop.

4. 4 Validation et évaluation de modèle AquaCrop

Selon Beheydt et al. (2007), la validation d'un quelconque modèle consiste à comparer les résultats de simulation par ce dernier avec des observations expérimentales ou des mesures du système réel. Avant de simuler les rendements futurs de blé dure, il a fallu d'abord valider AquaCrop avec des valeurs de rendements et de la biomasse réellement observées lors des essais réalisés par Khebbat. (2015) durant les trois campagnes agricoles : 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013 au niveau de la ferme expérimentale de Sétif.

Ainsi, après avoir introduit sur AquaCrop les données de sol de site de la ferme expérimentale de Sétif et les données journalières de Tmax, de Tmin, de P et de l'ET₀ calculées avec ET₀ calculator pour les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013, les rendements et la biomasse sont simulés par AquaCrop pour ces trois années en appliquant les dates de semis au 30 novembre 2010, 30 novembre 2011 et 7 décembre 2012, cependant les valeurs des paramètres non conservatifs de cultivar Mexicali indiquées sur le Tableau.4 ci-dessus, sont calibrées plusieurs fois de façon à obtenir des valeurs de rendement en grain et de la biomasse simulées proches de celles observées durant ces trois années, donc les valeurs finales des paramètres non conservatifs indiquées sur le Tableau.4 sont calibrées selon ce principe, ces valeurs sont par la suite

appliquées dans tous les scénarios de simulation sur AquaCrop. Les rendements en grains et la biomasse simulés par AquaCrop sont par la suite comparés à ceux observés sur le site expérimental de Sétif durant ces trois les trois campagnes agricoles.

4.5 Évaluation de la fiabilité des sorties de modèle AquaCrop

D'après (Mall et al. 2004), l'estimation de la différence entre les données simulées et observées est effectuée en calculant plusieurs indices. Dans cette étude, pour évaluer la qualité de l'accord entre les données de rendements et de la biomasse observées et celles simulées par AquaCrop pour ces trois années d'essai, trois indices statistiques sont utilisés: l'indice de la racine carrée de l'erreur moyenne (RMSE) (équation Eq. 4), Hyndman et Koehler, (2006), l'indice la racine carrée de l'erreur moyenne normalisée (NRMSE) (Eq.5) (Wallach et Goffinet., 1987) et l'indice d'accord de Willmott (d) (Eq. 6) (Willmott, 1982)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad \text{Eq. 4}$$

Où S_i et O_i sont les valeurs simulées et mesurées, respectivement, et i est le nombre d'observations. L'unité pour RMSE est la même que celle pour S_i et O_i , l'ajustement d'un modèle s'améliore quand RMSE est proche de zéro (Abedinpour et al., 2014).

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \times 100 \quad \text{(Eq. 5)}$$

Tableau 4. Valeur des paramètres non conservatifs (calibrés et observés) et des paramètres conservatifs sur AquaCrop.

<i>Paramètres de calibration de modèle AquaCrop</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité ou signification</i>	<i>Source</i>
La canopée initial de jeune plan à 90% de levée (CC0)	4.5	%	Calibré
Densité de semis	300	Plant m ⁻²	Observée
La canopée maximum (CCx)	90	%	Calibré
Le coefficient de déclin de la canopée (CDC)	0.405	% Degré jour de croissance (DJC)	Calibré
Le coefficient de croissance de canopée (CGC)	0.669	% (DJC)	Calibré
Profondeur d'enracinement effective	1	Mètre	Observée
Le coefficient de transpiration de la plante (Tr)	0.98		Calibré
La productivité de l'eau normalisée pour l'année 2009 (WP)	13	g m ⁻²	Calibrée
Indice de récolte de référence (HI ₀)	57	%	Observée
Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour l'expansion de la canopée, limite supérieure	0.2	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour l'expansion de la canopée, limite inférieure	0.6	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Facteur de forme de l'expansion de la canopée	5	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour la limite supérieure de fermeture des stomates	0.6	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Facteur de forme de fermeture stomatique	2.5	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Seuil d'épuisement des eaux du sol pour la sénescence de la canopée, limite supérieure	0.7	Fraction de l'eau totale disponible dans le sol	Calibré
Facteur de forme sénescence précoce	2.5		Calibré
Température de base	0	°C	Conservée
Température maximale	26	°C	Conservée
La durée de semis jusqu'à la levée	532	(DJC)	Observée
La durée pour réaliser (HI)	874	(DJC)	Observée
La durée de la floraison	570	(DJC)	Observée
La durée pour atteindre la CCx	1767	(DJC)	Observée
La durée pour atteindre la profondeur racinaire maximale	2880	(DJC)	Observée
La durée de la floraison	2945	(DJC)	Observée
La durée de début de la sénescence de la canopée	3439	(DJC)	Observée
La durée pour atteindre la maturité	3819	(DJC)	Observée

Où \bar{O} est la moyenne des observations. La précision du modèle est excellente si $\text{NRMSE} < 10 \%$, bonne si $10 \% \leq \text{NRMSE} \leq 20 \%$, passable si $20 \% \leq \text{NRMSE} \leq 30 \%$ et médiocre si $\text{NRMSE} > 30 \%$ (Amiri, 2016).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

À mesure que l'indice d'accord de Willmott (d) se rapproche de l'unité à mesure que l'ajustement du modèle s'améliore (Hsiao et al., 2009).

5. Test de Pearson

Dans le test de Pearson, on suppose qu'il existe deux variables X et Y, chacune ayant n valeurs: X_1, X_2, \dots, X_n et Y_1, Y_2, \dots, Y_n , \bar{X} est la moyenne de X et \bar{Y} est la moyenne de Y, respectivement. Le coefficient de Pearson r a été calculé à l'aide de l'équation 7 (Gray et Kinnear, 2012).

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Ainsi, r varie comme suit: $-1 \leq r \leq 1$. Les valeurs positives de r signifient une corrélation linéaire positive et les valeurs négatives signifient une corrélation linéaire négative; si $r = 0$, cela révèle qu'il n'y a pas de corrélation linéaire; aussi si r est proche de 1 ou -1 , plus la corrélation linéaire est forte.

Afin de détecter toute sensibilité éventuelle des rendements de BD au CC futur projeté, le coefficient de corrélation de Pearson r, a été appliqué entre, les séries chronologiques interannuelles des température moyennes saisonnières de l'air (T_{CC}) (saison qui coïncide avec la période de déroulement de cycle de croissance de cultivar Mexicali), des cumuls saisonniers des précipitations (P_{CC}) et de rayonnement solaire incident net (R_{nCC}), projetées dans tous les quatre scénarios futurs et observées durant la PR, avec les séries des rendements annuels de ce même cultivar de BD, simulés par AquaCrop pour ces mêmes scénarios. Ce test a été également, appliqué entre la série chronologique des durées de cycle de croissance du cultivar de BD Mexicali (D_{CC}), simulées par Aquacrop pour ces mêmes scénarios cités ci-dessus, et les séries interannuelles de P_{CC} et T_{CC} projetées dans tous les quatre scénarios futurs et celles observées durant de la PR.

6. Conclusion

L'indisponibilité des données climatiques et de sol a limité la zone d'étude sur deux sites expérimentaux de Sétif et de BBA, qui faisait partie d'une région potentielle de la culture pluviale de BD en Algérie, qui est la région des HPO. Dans ce travail de recherche, le recours aux données d'expérimentation menée à Sétif sur la culture de BD en pluvial, a permis de valider le modèle de culture AquaCrop, selon les conditions pédoclimatiques des HPO. La pertinence des trois indices statistiques (RMSE, NRMSE et l'indice d'accord de Willmott (d)), ont permis de mesurer le degré de fiabilité des simulations faites par AquaCrop, ce même indice RMSE a permis aussi d'évaluer le degré de fiabilité des projections climatiques futures faites par le couple modèle GCM/RCM : ICHEC-KNMI, pour la période historique 1981-2010. Le choix de la méthode des deltas pour la correction des biais présents dans les projections climatiques brutes est justifié par son adaptation au climat semi-aride de la région d'étude, caractérisée par la forte variabilité des conditions climatiques.



Résultats et discussions

Chapitre V : Étude du climat récent observé et changement climatique futur projeté à Sétif et Bordj Bou Arreridj

1. Introduction

Dans ce chapitre, sont analysés et discutés les résultats de la modélisation du climat futur pour ressortir le CC par rapport à la PR sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA. Ainsi, ce chapitre entame d'abord l'évaluation de la qualité des données simulées des P (mm), Tmax et Tmin (en °C), de Rn (en MJ/m²), V (en m/s) et Hr (en %), simulées par le modèle climatique pour la PR, ces données simulées sont comparées à celles enregistrées durant la PR, au niveau des deux stations météorologiques de Sétif et BBA, appartenant au réseau de l'ONM. Le degré de rapprochement entre les données observées et simulées est fait avec l'indice statistique RMSE. Ensuite, une analyse de CC futur est faite en comparant les moyennes de 30 ans de ces six paramètres climatiques cités ci-dessus (à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle) et observées durant la PR 1981-2010 par rapport à celles projetées dans les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, sous RCP 4.5 et RCP 8.5. Les résultats de cette comparaison de climat actuel au climat futur sont discutés et comparés à ceux obtenus par d'autres travaux de recherche sur la région méditerranéenne et d'autres régions semi-arides à travers le monde.

2. Évaluation de la qualité des données climatiques simulées pour la période de référence

Sur la Figure.33, sont indiquées les moyennes mensuelles de P (mm), Tmax et Tmin (°C), et Rn (MJ/m²) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR, ces moyennes enregistrées sont comparées à celles simulées par le modèle climatique ICHEC_KNMI pour la même période, aussi sur cette même figure sont indiquées les valeurs calculées de RMSE pour chacun des quatre paramètres climatiques étudiés. Les Figure.32.a, c et g montrent que Tmax, Tmin et Rn, à la station de Sétif, sont simulés avec une grande précision comme l'indiquent les faibles valeurs de leurs RMSE respectifs (0.439°C, 1.381°C et 2,785 MJ/m²). Toutefois, les P ont été simulées avec une précision relativement inférieure, comme le montre l'histogramme de la Figure.33.e et la valeur de RMSE relativement plus élevée (9.875 mm), les P simulées par le modèle climatique ICHEC_KNMI, sont sous-estimées pour tous les mois de l'année à l'exception du mois de Juin, où elles sont surestimées.

Pour la station de BBA, Tmax, Tmin et Rn ont été simulés avec une grande précision comme le montre les faibles valeurs de leur RMSE respectifs 1,998°C, 2,029°C et 2,193 MJ/m², (Figure. 33. b, d et h); cependant les P ont été simulés avec moins de précision

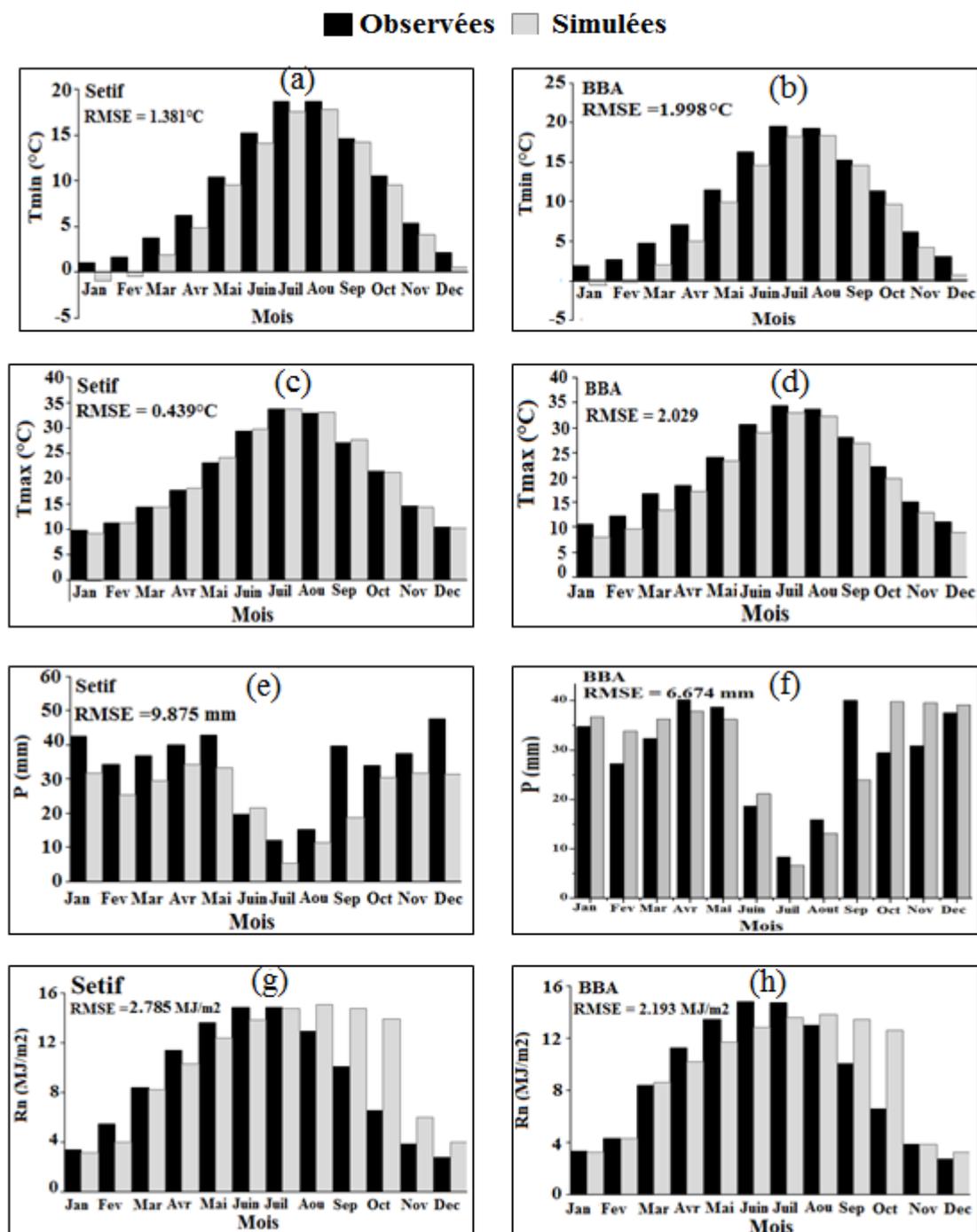


Figure 33. Comparaison de degré de rapprochement entre les moyennes mensuelles observées et simulées des Tmin, Tmax, P, et de Rn des deux stations de Sétif et de BBA pour la PR

(RMSE = 6,674 mm), ainsi pour les mois de la période de l'année qui s'étale d'Octobre à Mars, les précipitations simulées sont surestimées, en revanche celles simulées pour les restes des mois de l'année (Avril à Septembre), sont sous estimées par rapport aux P enregistrées sur la station de BBA, durant la PR. Selon Romera et al. (2015), la grande complexité de l'orographie, la grande variabilité spatiale des précipitations et le faible réseau de stations de leur observation dans la

région du Maghreb, ont rendu leur simulation dans la base de données EURO-CORDEX pleines d'incertitudes (ou biais). Ces auteurs ont déduit que les simulations de précipitations de la période historique 1981-2006 sont sous-estimées sur certaines stations météorologiques, tandis qu'elles sont surestimées sur d'autres. Cela explique, pourquoi les précipitations simulées sont sous-estimées à la station de Sétif et surestimées à la station de BBA, pendant presque tous les mois de l'année. La sous-estimation de Rn au printemps et en été sur ces deux stations, peut être causée par la surestimation de modèle climatique de la couverture nuageuse comme le suggèrent Freidenreich et al. (2011).

3. Changement de climat futur en comparaison au climat actuel (1981-2010)

Pour ressortir le changement climatique prédit pour les deux stations Sétif et BBA, les moyennes annuelles, mensuelles et saisonnières des paramètres climatiques P, Tmax, Tmin, température moyenne (Tmoy), Hr, V et Rn observées durant la PR, sur ces deux stations sont comparées à celles projetées par le modèle ICHEC_KNMI, sous les scénarios futurs RCP 4.5 (2035-2064), RCP 4.5 (2065-2094), RCP 8.5 (2035-2064) et RCP 8.5 (2065-2094), qui sont désignés respectivement par : S1, S2, S3 et S4.

3.1. A l'échelle annuelle

3.1.1 Précipitations

Selon les résultats indiqués dans la Figure. 34.a, à la station de Sétif, la moyenne à long terme (30 ans) des cumuls pluviométriques annuels (P_a) enregistrée durant la PR est 402.3 mm. Ainsi, la P_a est prévue d'augmenter de + 144.6, + 295.2, + 180.8 et de + 74.7 mm, correspondant à des taux de hausse de + 35.9, + 73.4, + 44.9 et de + 18.5 % sous S1, S2, S3 et S4, respectivement. Pour la station de BBA (Figure. 34.b), la P_a enregistrée durant la PR est 354.8 mm, ainsi des hausses de P_a de + 126, + 130.2, + 162.9 et de + 13.4 mm correspondant à des taux de hausse de + 35.5, + 27.1, + 45.9 et de + 3.8 % sont prévues sous S1, S2, S3 et S4, respectivement. Ainsi, il est projeté que les deux stations étudiées connaîtront une augmentation des cumuls annuels des précipitations dans tous les scénarios futurs en comparaison à la PR (1981-2010).

Ces projections futures des précipitations pour Sétif et BBA ne corroborent pas avec celles projetées par un ensemble de 12 modèles de la phase 5 du projet d'Inter Comparaison de Modèles Couplés (Coupled Model Inter-Comparison Project Phase 5) (CMIP5), utilisés dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5) du GIEC et dont les données sont disponibles sur le site Web du Groupe de la Banque mondiale: (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/Climate-data-projections>). Ainsi, selon les projections de CMIP5, il est prévu des baisses des cumuls pluviométriques annuels sur Sétif et BBA de - 5.1, - 6.9, -5.4 et de -13.9 % sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099)

respectivement. De leur côté, Rouabhi et al. (2019) ont déduit une tendance à la baisse des cumuls des précipitations annuelles en 2070 d'environ - 66 mm sous RCP 2.6 et de - 154 mm sous RCP 8.5 par rapport à la période de référence (1960-1990) dans la même région d'étude. Les résultats des projections des précipitations obtenus dans cette étude n'appuyaient pas aussi ceux obtenus par Tramblay et al. (2016), qui ont projeté une tendance à la baisse des précipitations dans 47 principaux bassins versants en Afrique du Nord, simulés par le modèle climatique régional SMHI-RCA4 conduit par 5 modèles climatiques globaux (CNRM, IPSL, HADGEM, ECEARTH, MPI), sous les scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Pour le Maroc, Tramblay et al. (2013), ont rapporté que les moyennes des totaux annuels des précipitations sont prévues de diminuer en 2041–2062 de -15 % et de -19 % sous les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5, respectivement.

Selon Mascaro et al. (2018), les RCM utilisées pour une réduction d'échelle plus fine des données globales des précipitations issues de la base de données Euro-Cordex, sont caractérisées par différents types de lacunes dans la simulation des tendances des précipitations annuelles et saisonnières observées. Ce sont les limites les plus critiques des RCM qui nécessitent une investigation plus approfondie en explorant les raisons physiques menant aux biais du modèle, la compréhension de ces dernières sera utile pour améliorer les techniques de correction des biais (Addor et al. 2016).

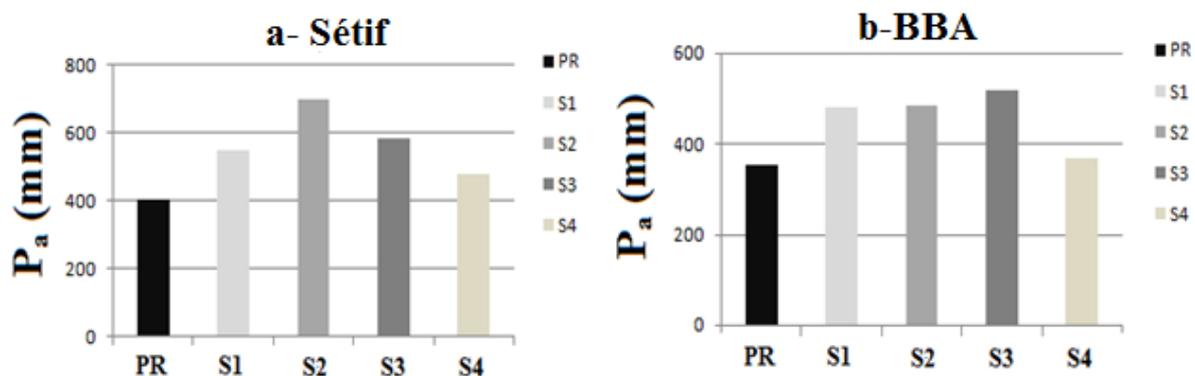


Figure 34. Comparaison des moyennes de 30 ans des P_a entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4.

3.1.2 Températures

3.1.2.1 Températures maximales

La Figure. 35, montre la comparaison des moyennes annuelles (30 ans) de la température maximale (T_{max_a}) enregistrées sur les deux stations de Sétif et BBA, durant la PR par rapport aux T_{max_a} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Ainsi, selon la Figure.35.a, la T_{max_a} enregistrée sur la station météorologique de Sétif durant la PR est 20.4°C, elle est prévue de baisser de - 1.7, - 1.3 et de - 0.9°C sous S1, S2 et S3, respectivement, alors qu'elle est projetée d'augmenter de +1°C sous S4.

Pour la station de BBA (Figure.35.b), la T_{max_a} observée durant la PR est 21.3°C, elle est attendue qu'elle baisse de - 0.9°C sous S1 et S3, alors qu'elle est prévue d'augmenter de +1°C sous S2 et S4.

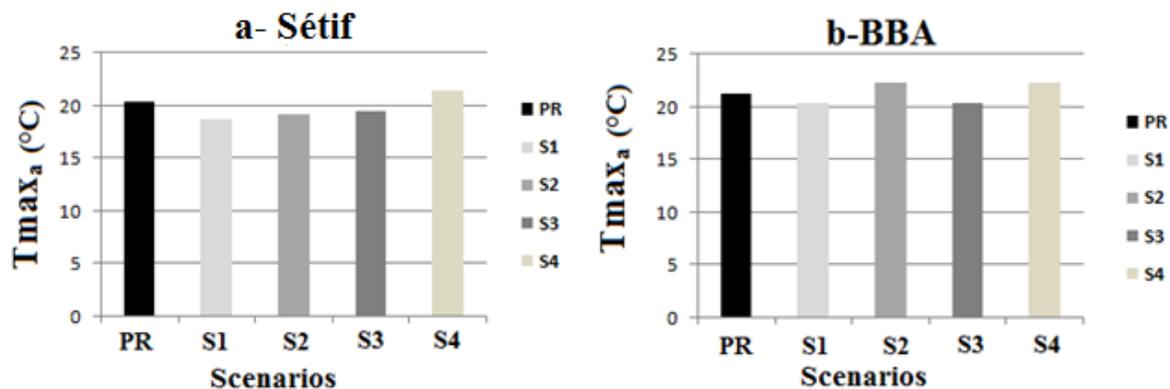


Figure 35. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_a} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

Contrairement à ces résultats, les données des projections climatiques de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>), n'indiquent aucune baisse de la T_{max_a} dans le futur sous RCP 4.5 et RCP 8.5, ainsi selon ces données il est prévu des hausses de la T_{max_a} de + 1.9, + 4.3, + 1.9 et de + 3.5°C et de + 1.5, + 2.3, + 1.9 et de + 4.4°C sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099), respectivement à Sétif et à BBA.

3.1.2.2 Températures minimales

La Figure.36, montre la comparaison des moyennes annuelles (30 ans) de la température minimale (T_{min_a}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{min_a} projetées dans le futur, sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Pour la station de Sétif (Figure.36.a), la T_{min_a} enregistrée durant la PR est 8.9°C, elle est prévue de baisser de - 0.6 et de - 0.4°C sous S1 et S3 dans l'ordre, contrairement aux scénarios S2 et S4 où des hausses de T_{min_a} de + 0.5 et de + 1.1°C sont projetées respectivement.

Dans le cas de la station de BBA (Figure.36.b), la T_{min_a} enregistrée durant PR est 8.9°C , elle est prévue de baisser de -0.8 et de -0.6°C sous S1 et de S3, respectivement, tandis que sous S4 une hausse de $+1.3^{\circ}\text{C}$ est attendue, alors que sous S2 aucun changement de T_{min_a} n'est attendu.

Selon les projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale cité déjà précédemment, à Sétif et à BBA, il n'est prévu que des hausses de T_{min_a} de $+1.3$, $+2.1$, $+1.7$ et de $+3.8^{\circ}\text{C}$ et de $+1.3$, $+2$, $+1.7$ et de $+3.2^{\circ}\text{C}$, sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099), respectivement à Sétif et BBA.

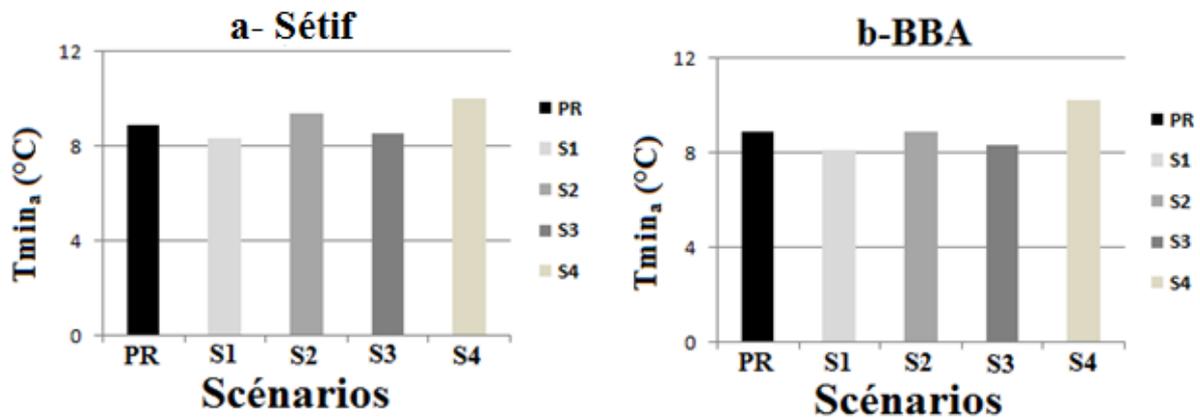


Figure 36. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{min_a} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.1.2.3 Températures moyennes

La Figure.37, montre la comparaison des moyennes annuelles (30 ans) de la température moyenne (T_{moy_a}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{moy_a} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

La T_{moy_a} enregistrée à la station de Sétif durant la PR est 14.2°C , elle est projetée de baisser de -0.6°C sous S1, alors qu'elle est prévue d'augmenter de $+0.1$, $+0.1$ et de $+1.2^{\circ}\text{C}$ sous S2, S3 et S4 respectivement. Pour la station de BBA (Figure. 37.b), la T_{moy_a} enregistrée durant la PR est 15.6°C , elle est projetée de baisser de -0.8 et de -0.7°C sous S1 et S3 respectivement, tandis que des hausses de $+0.3$ et de $+0.8^{\circ}\text{C}$ sont projetées sous S2 et S4 respectivement.

Les projections de la T_{moy_a} à Sétif sous S1 ne corroborent pas avec celle de CMIP5 qui prévoient une hausse de la T_{moy_a} de $+1.4^{\circ}\text{C}$ sous le scénario RCP 4.5 (2020-2059), cependant les projections de la T_{moy_a} sous S2, S3 et S4 confirment celles de CMIP5, qui indiquent des hausses de la T_{moy_a} de $+1.4$, $+2.1$, $+1.8$ et de $+2.9^{\circ}\text{C}$ sous les scénarios RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099), respectivement. Contrairement aux résultats ci-dessus, les projections de CMIP5 pour la station de BBA ne prévoient que des hausses de T_{moy_a}

de + 1.4, + 2.2, + 1.8 et de + 4.1°C sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099), respectivement.

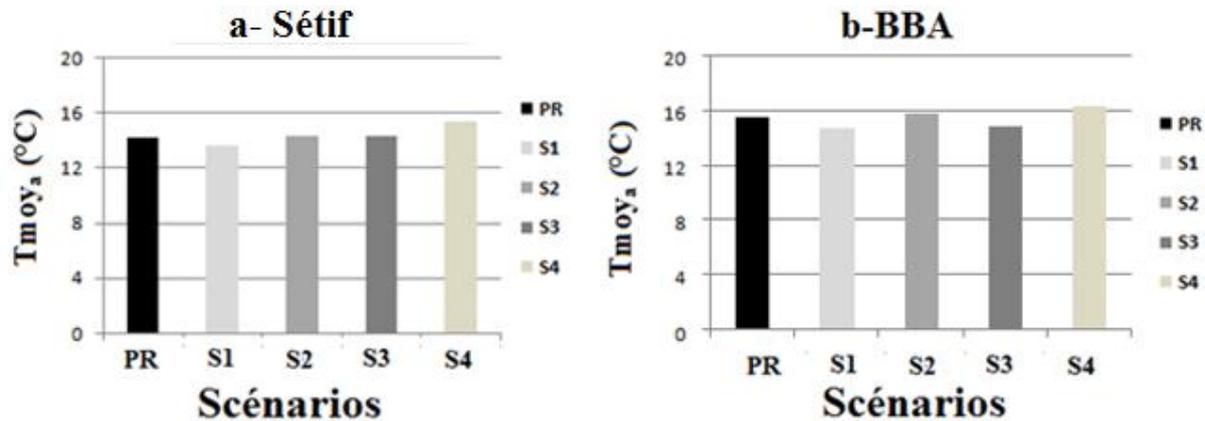


Figure 37. Comparaison des moyennes de 30 ans des Tmoya entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.1.3 Rayonnement solaire net incident

La Figure.38, montre la comparaison des moyennes annuelles (de 30 ans) de rayonnement net incident (R_{n_a}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux R_{n_a} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Pour la station de Sétif (Figure.38.a), la R_{n_a} observée durant la PR est estimée à 3289.8 MJ/m², elle est prévue de diminuer de - 110, - 157, - 516 et de - 479 MJ/m² correspondant à des taux de baisse de - 3.4, - 4.8, - 15.7 et de - 14.6 %, sous S1, S2, S3 et S4, respectivement. A la station de BBA (voire Figure.38.b), la R_{n_a} durant la PR est estimée à 3277.7 MJ/m², elle est prévue de diminuer de - 122 MJ/m² (- 3.7 %), - 40 MJ/m² (-1.2 %), -15.7 MJ/m² (- 0.7 %) et de - 14.6 MJ/m² (- 0.9 %) sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre.

Ces résultats confirment les conclusions d'Ahmad et al. (2019) dans une région semi-aride du Pakistan. Selon Liu et al. (2013) et Roderick et al. (2007), la diminution de rayonnement solaire net incident est attribuée à l'augmentation prévue de la concentration des aérosols d'origine anthropique et d'autres polluants dans l'atmosphère, en raison de l'augmentation de la température. Ils ont également suggéré que le rayonnement solaire net incident est en corrélation avec les précipitations parce que la couverture nuageuse le réduit. Ainsi, la diminution attendue de R_{n_a} sous les quatre scénarios futurs à Sétif et BBA pourrait être aussi due à l'augmentation attendue des précipitations.

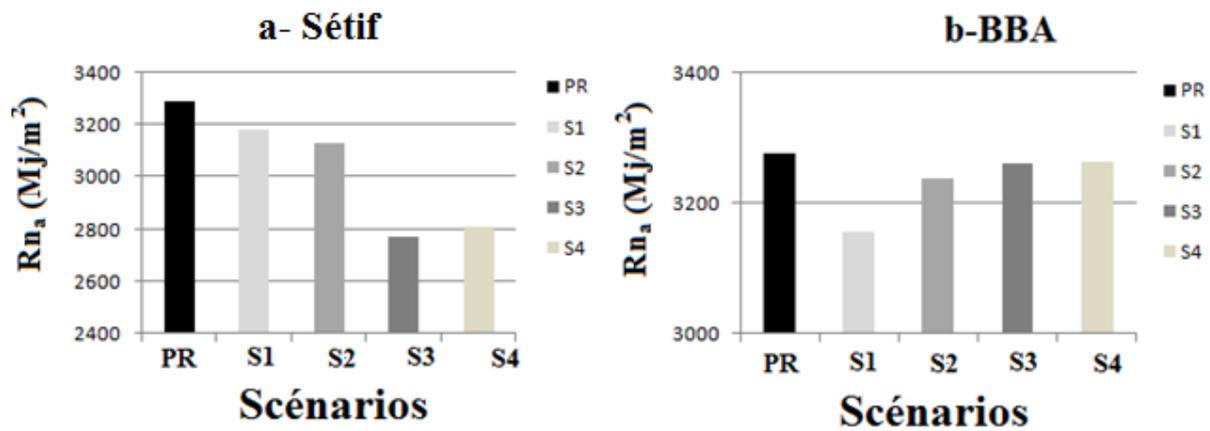


Figure 38. Comparaison des moyennes de 30 ans des Rna entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.1.4 Vitesse de vent

La Figure.39, montre la comparaison des moyennes annuelles (30 ans) de vitesse de vent (V_a) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux V_a projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

La V_a enregistrée à la station de Sétif (Figure. 39.a), est 2.8 m/s, elle est prévue d'augmenter de + 1.6, + 1.9, + 0.2 et + 0.1 m/s sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre. Pour la station de BBA (Figure.39.b), la V_a enregistrée durant la PR est 2.7 m/s, ainsi des hausses de + 2.4 et de + 2.5 m/s sont prévues uniquement sous S1 et S2, tandis que des baisses de - 0.5 et - 0.7 m/s sont projetées sous S3 et S4. Ces résultats ne corroborent pas avec les résultats d'Alvarez et al. (2018), qui ont étudié l'évolution future de l'énergie éolienne selon les changements de la vitesse de vent en 2020-2070 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, en comparaison à la période historique 1979-2004, selon leurs résultats deux modèles climatiques (IPSL et MOHC) prévoient des baisses importantes de la vitesse de vent, dans la région Nord africaine sous RCP 4.5, cela contrarie les projections de la vitesse de vent sous S1 et S2 à Sétif et à BBA, cependant ils ont déduit que la majorité des modèles climatiques prévoient des hausses de la moyenne annuelle de la vitesse de vent, sous RCP 8.5 à l'exception de même modèle ICHEC, utilisé dans cette étude qui a prévu une baisse de la vitesse de vent dans la région littorale de l'Afrique de Nord, ce qui corrobore avec les résultats obtenus avec ce même modèle pour BBA, sous S3 et S4.

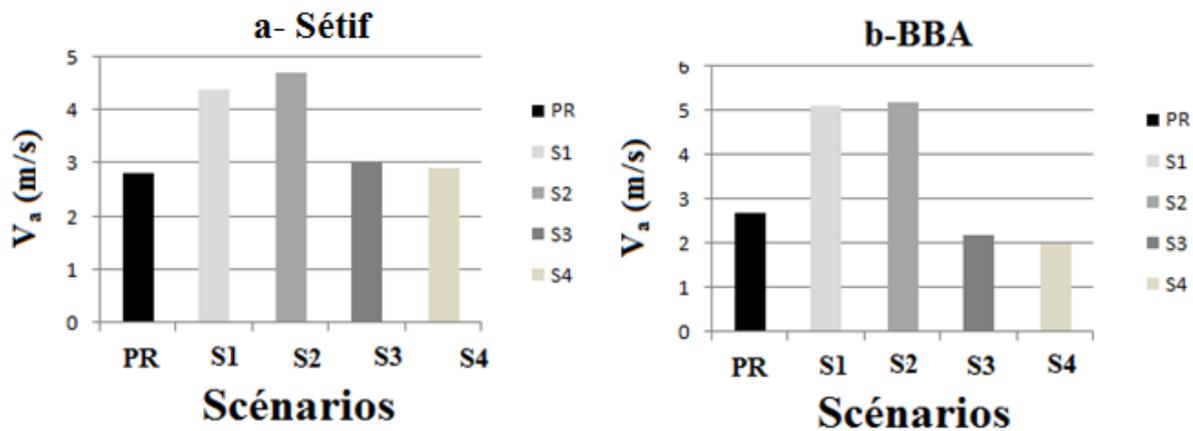


Figure 39. Comparaison des moyennes de 30 ans des V_a entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.1.5 Humidité relative

La Figure.40 montre la comparaison des moyennes annuelles (30 ans) de l'humidité relative (H_{r_a}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant PR par rapport aux H_{r_a} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

La H_{r_a} enregistrée à la station de Sétif durant la PR est 62% (Figure. 40.a), cette dernière est prévue d'augmenter avec des taux de hausse de + 19.8, + 6.6, + 3.5 et de + 1.2 % sous S1, S2, S3 et S4, respectivement. Pour la station de BBA, la H_{r_a} enregistrée durant la PR est 60 % (Voire Figure.40.b), elle est projetée d'augmenter avec des taux de hausse de + 20, + 21, + 4.1 et + 1.4% sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre. Ainsi selon ces résultats, sous les deux scénarios RCP, une légère augmentation de H_{r_a} est prévue pour les deux stations Sétif et BBA. Ces résultats confirment ceux obtenus par Gharbia et al. (2016) qui ont déduit une légère augmentation de l'humidité relative dans les horizons 2020, 2050 et 2080 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, en comparaison à l'humidité relative observée au cours de la période de référence 1961-2000 en Irlande. Autrement, les résultats obtenus à Sétif et BBA, ne corroborent pas avec ceux de O'Gorman et Muller (2010), selon ces deux auteurs, l'analyse des simulations faites par les modèles de CMIP3 et CMIP5 montrent que l'humidité relative près de la surface diminue sur la plupart des zones terrestres, à mesure que les températures augmentent, à l'exception notable dans certaines régions de l'Afrique tropicale. A titre d'exemple, au Ouganda, Mutua et al. (2020), ont projeté une hausse de l'humidité relative qui varie de + 4 à + 7 % sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 en 2100. Le principal facteur contribuant à ces diminutions de l'humidité relative sur la terre est l'augmentation de la température qui est plus importante sur la terre que sur l'océan dans les scénarios RCP (Joshi et al. 2008; Fasullo, 2010; O'Gorman et Muller, 2010). L'humidité spécifique de l'air provenant d'un réchauffement plus lent des océans sera régie par les

températures de saturation de l'air océanique. Au fur et à mesure que cet air se déplace sur la terre et se réchauffe, son humidité relative diminue car toute humidification supplémentaire de l'air au-dessus de la terre est insuffisante pour maintenir une humidité relative constante Collins et al. (2013).

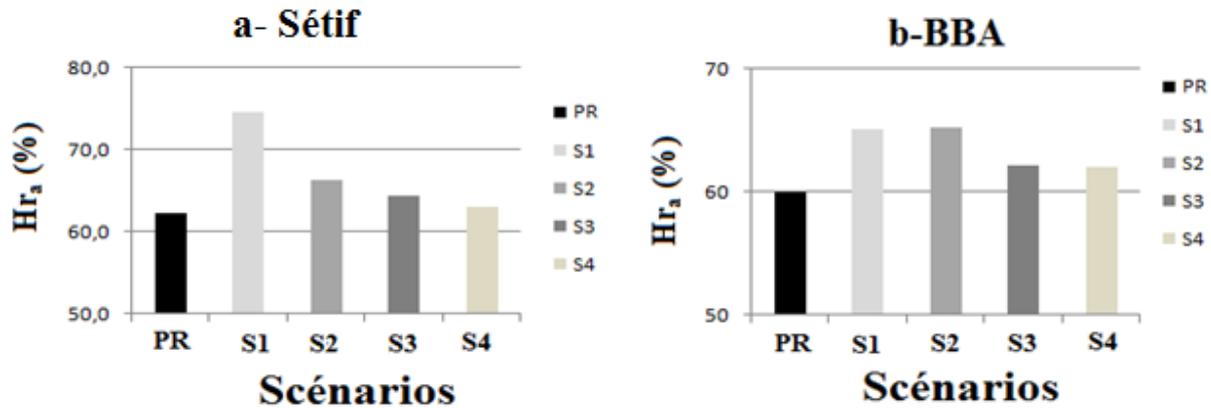


Figure 40. Comparaison des moyennes de 30 ans des Hra entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.1.6 Concentrations en CO₂ dans l'atmosphère

Les moyennes annuelles des concentrations en CO₂ ([CO₂]) durant la PR et les deux horizons futurs sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, sont identiques sur les deux stations (Figure. 40), ces données de [CO₂] sont disponibles dans la base de données jointe dans le modèle AquaCrop. Il est à noter que ces [CO₂] durant la PR, disponibles dans la base de données de modèle AquaCrop sont issues des mesures en continu faites à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Ainsi, durant cette PR, la moyenne interannuelle des [CO₂] est estimée à 362.1 ppm, elle est prévue d'augmenter de + 122, 167.1, 180.1 et de 394.1 ppm correspondant à des taux de hausse de +33.7, + 46, + 49.7 et de +108.8% sous les scénarios S1, S2, S3 et S4 respectivement. Selon Zhao et al. (2020), les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sont deux voies de forçage radiatif qui seront portées à 4.5 W/m² et 8.5 W/m² équivalant à 650 et à 1370 ppm des [CO₂], respectivement, d'ici 2100. Les émissions des GES anthropiques depuis l'époque préindustrielle ont provoqué l'augmentation dans l'atmosphère de la concentration des GES tel que le CO₂, le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Entre 1750 et 2011, le cumul des émissions atmosphériques anthropiques de CO₂ s'élève à 2 040 ± 310 GtCO₂. Environ 40%, de ces émissions sont restées dans l'atmosphère (880 ± 35 GtCO₂), le reste ayant été éliminé de l'atmosphère et se trouvant stocké dans la végétation et le sol ainsi que dans l'océan. L'océan a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux. Environ la moitié

des émissions anthropiques de CO₂ cumulées entre 1750 et 2011 ont été produites durant les 40 dernières années de cette période (GIEC, 2014).

Les émissions de CO₂ imputables à l'usage de combustibles fossiles et aux procédés industriels ont contribué dans une proportion de 78 % à l'accroissement du total mondial des émissions de GES entre 1970 et 2010.

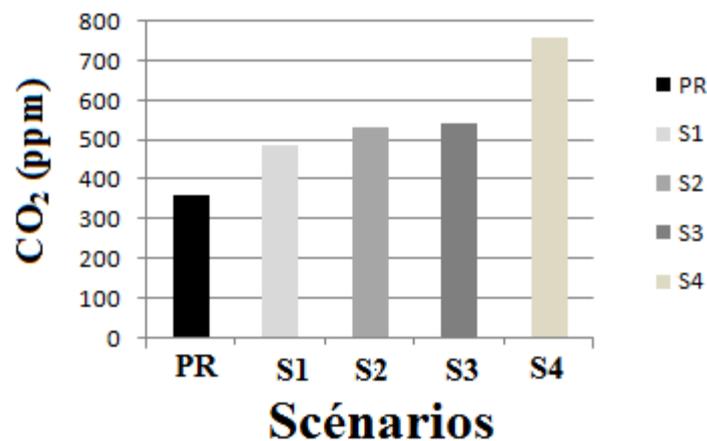


Figure 41. Comparaison des moyennes de 30 ans des [CO₂] entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.2 Échelle mensuelle

3.2.1 Précipitations

La Figure.42 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) des précipitations (P_m) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux P_m projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Selon la Figure .42.a, à la station de Sétif, sous le scénario S1, les P_m sont prévues de diminuer de -1.6, -10.5 et de - 4.3 mm durant les mois de Février, Juin et Octobre, respectivement, cependant pour le reste des mois de l'année, les P_m sont projetées d'augmenter de + 3 mm au mois d'août à + 56.4 mm au mois de Juillet. Sous le scénario S2, les P_m sont prévues d'augmenter durant tous les mois de l'année, cette augmentation évoluera de + 3.3 mm au mois de Juin à + 29.3 mm au mois d'Octobre et Décembre. Sous le scénario S3, les P_m sont projetées de diminuer de - 1.1 à - 16,2 mm durant les mois de Janvier, Juin, Juillet, Août, Octobre, Novembre et Décembre, le reste des mois de l'année vont connaître une hausse des P_m qui varie de + 4 mm au mois de Février à + 73.3 mm au mois de Septembre. Sous le scénario S4, la baisse des P_m est prévue au cours des mois de Janvier, Février, Octobre, Novembre et Décembre et les mois de la période de Mai- Août, cette baisse des P_m varie entre - 1.4 mm au mois de Mai à - 26.1 mm au mois de Juin.

Pour la station de BBA, selon la Figure. 42.b, sous les scenario S1, les P_m sont prévues de baisser durant les mois de Janvier, Février, Juin, Octobre, Novembre, et Décembre avec un pic de diminution de - 8.1 mm au mois de Février, en revanche, le reste des mois de l'année vont connaître une hausse des P_m qui pourra atteindre + 11 mm au mois de Décembre. Sous le scénario S2, les P_m devraient baisser durant les mois de Février à Avril et les mois d'Octobre et Novembre avec un pic de diminution de - 20 mm au cours du mois de Février, cependant pour les autres mois de l'année, une hausse des P_m est prévue avec un pic de + 23.8 mm au mois d'Août. Sous le scénario S3, une baisse des P_m est prévue durant le mois de Janvier et les mois des périodes Juin-Août et Octobre-Décembre avec un pic de baisse de - 16.2 mm au mois de Novembre, sinon une hausse des P_m est prévue pour le reste des mois de l'année avec un pic de + 73.3 mm au mois de Septembre. Sous le scénario S4, la baisse des P_m est prévue durant les mois de Janvier, Février et les mois de la période Mai- Août et Octobre -Décembre avec un pic de baisse de - 26.1 mm au mois de Juin. Pour le reste des mois de l'année, une hausse des P_m est prévue avec un pic de + 51.4 mm au mois de Septembre.

Selon les projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>, il est prévu des baisses des P_m durant tous les mois de l'année, ainsi selon ces projections, en moyenne les précipitations devraient baisser de - 2.2, - 2.9, - 2.3 et de - 5.8 mm/mois sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) respectivement. Pour le Maroc, Trambly et al. (2013) ont rapporté que la baisse des précipitations prévues en 2041–2062 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, devrait être plus significative durant les mois de la période Novembre à Avril.

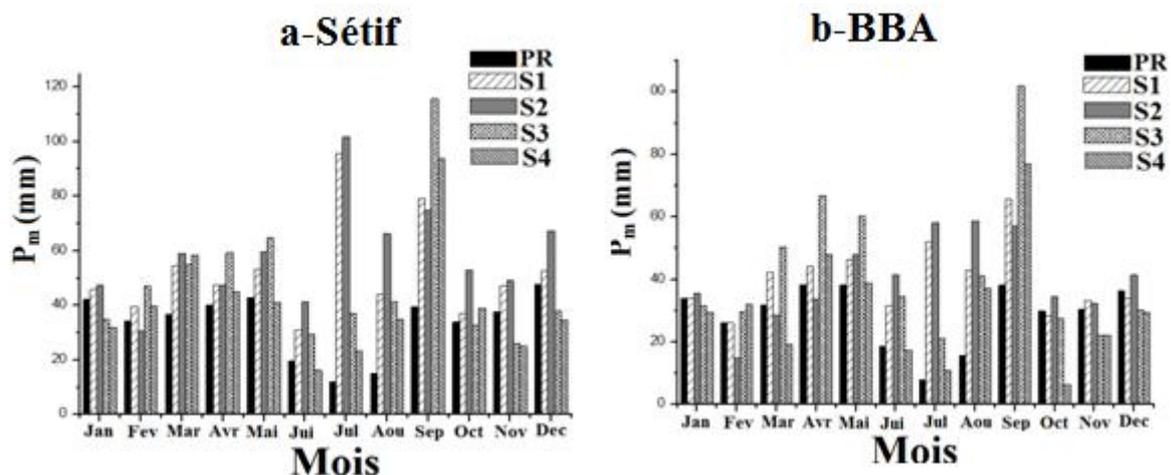


Figure 42. Comparaison des moyennes de 30 ans des P_m entre la PR et les scenarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA.

3.2.2 Températures

3.2.2.1 Températures maximales

La Figure.43 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) des températures maximales (T_{max_m}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA, durant la PR par rapport aux T_{max_m} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Pour la station de Sétif (Figure. 43.a), en comparaison avec la T_{max_m} enregistrée durant la PR, sous S1, la T_{max_m} est prévue de baisser au mois de Février et durant les mois de la période Mai-Octobre, cette diminution varie de -0.5°C pour le mois de Février à -3°C au mois de Juillet, pour les autres mois de l'année une hausse des T_{max_m} est prévue, elle varie de $+1.7^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à $+3.7^{\circ}\text{C}$ au mois de Décembre. Sous S2, les T_{max_m} sont prévues de baisser durant les mois de la période Mai- Octobre, cette diminution des T_{max_m} varie de -1.6°C au mois d'Octobre à -4°C au mois de Juillet. En revanche, pour le reste des mois de l'année, une hausse des T_{max_m} est projetée, elle varie de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à $+3.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier. Sous S3, une baisse des T_{max_m} est projetée durant les mois de la période Mars-Octobre, cette chute de T_{max_m} varie de -0.3°C au mois d'Avril à -2.8°C au mois de Juin, cependant une hausse de T_{max_m} qui varie de $+0.2^{\circ}\text{C}$ au mois de Février à $+1.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier est projetée durant les mois de la période Novembre-Février. Sous S4, durant les mois de la période Octobre à Avril, une hausse de T_{max_m} est projetée qui évolue entre $+0.8^{\circ}\text{C}$ au mois de Février et $+3^{\circ}\text{C}$ au mois de Décembre, une hausse de T_{max_m} de $+0.7$ et $+0.3^{\circ}\text{C}$ est aussi prévue pour les mois de Juillet et Août respectivement. Cependant une baisse de -0.9 , -1 et de -0.9°C est prévue pour les mois de Mai, Juin et Septembre.

Pour la station de BBA (Figure. 43.b), en comparaison avec la PR, sous S1, il est prévu des baisses de T_{max_m} durant les mois de la période Mars-Octobre, cette baisse varie de -0.9°C au mois d'Août à -4.1°C au mois de Septembre, en revanche des hausses de T_{max_m} sont projetées durant le reste des mois de l'année, cette augmentation évolue de $+0.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Décembre et Février à $+0.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier. Sous S2, des chutes des T_{max_m} qui varient de -0.2°C au mois d'Août à -3.1°C au mois de Septembre sont projetées durant les mois de la période Mars-Octobre. Contrairement aux mois de la période Novembre à Février où des hausses de T_{max_m} sont projetées qui varient de $+0.8^{\circ}\text{C}$ au mois de Novembre à $+1.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier. Sous S3, durant la période Mars-Octobre sont prévues des baisses des T_{max_m} qui évoluent de -0.2°C au mois d'Avril à -2.8°C au mois de Septembre, pour le reste des mois de l'année des hausses des T_{max_m} qui varient de $+0.3$ au mois de Février à $+1.2^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier. Pour S4, des chutes de T_{max_m} qui évoluent entre -0.2°C au mois d'Août à -1.2°C au mois de Septembre, sont prévues durant la période Mai- Octobre, cependant une hausse de T_{max_m} est prévue pour les autres mois de l'année et qui varie entre $+1.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Mars à $+2.9^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier.

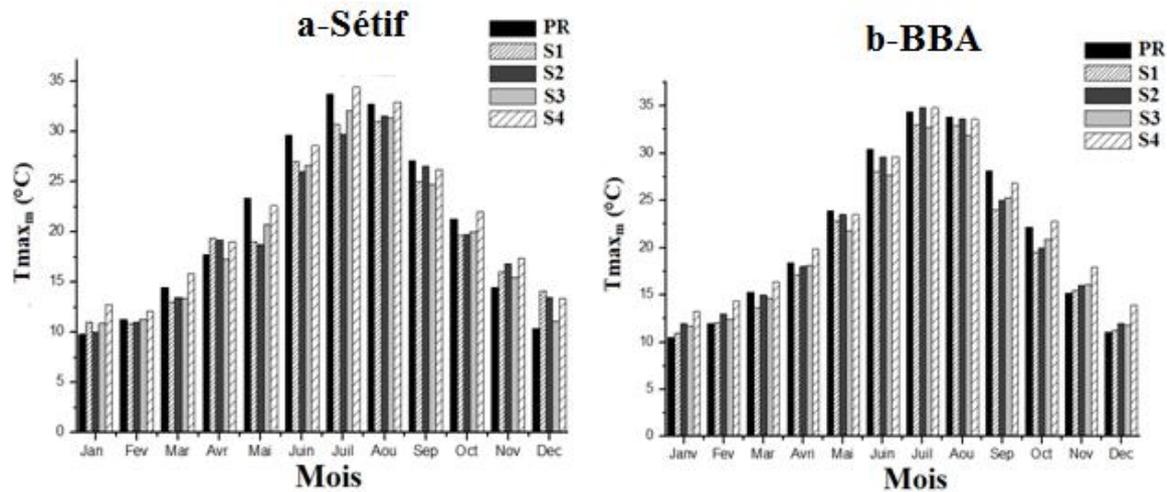


Figure 43. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

Selon les projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>), aucune baisse des T_{max_m} n'est prévue durant tous les mois de l'année dans les deux stations, ainsi pour Sétif, des hausses de T_{max_m} qui varient de $+1.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Mars à $+2.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet, de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois de Février à $+3.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet, de $+1.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout et de $+3.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+5.7^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet sont, respectivement projetées sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) dans l'ordre. Selon ces mêmes projections de CMIP5, pour BBA, des hausses de T_{max_m} qui varient de $+1.1$ au mois de Janvier à $+2.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet, de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois de Février à $+3.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet, de $+1.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+2.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Juillet, $+3.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+5.7^{\circ}\text{C}$ au Juillet, sont projetées sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) respectivement.

3.2.2.2 Températures minimales

La Figure. 44 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) des températures minimales (T_{min_m}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{min_m} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Pour la station de Sétif (Figure. 44.a), sous S1, des baisses des T_{min_m} qui varient de -1.6°C au mois de Mai à -2.9°C au mois d'Août sont projetées durant la période de l'année Mai-Novembre, tandis que des hausses de T_{min_m} qui évoluent de $+3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à $+4.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier, sont prévues pour le reste des mois de l'année. Sous S2, des baisses des T_{min_m} qui varient de -1.6°C au mois de mai à -2.7°C au mois d'Août sont projetées durant la période

Mai- Octobre, pour la période Novembre-Avril, des hausses des T_{min_m} qui varient de $+ 3.5^{\circ}\text{C}$ au mois de Novembre à $+ 4^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier sont projetée. Sous S3, des baisses des T_{min_m} sont projetées pour la période Avril-Octobre et qui varient de $- 0.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à -1.8°C au mois de Mai et Juin, cependant, une hausse des T_{min_m} est prédite durant la période Novembre-Mars qui évolue de $+ 0.2^{\circ}\text{C}$ au mois de Mars à $+1^{\circ}\text{C}$ au moi de Janvier, exception faite pour le mois de Février où la T_{min_m} ne connaîtra aucun changement. Sous S4, il est prévu des hausses de T_{min_m} durant tous les mois de l'année sauf Janvier où aucun changement de T_{min_m} n'est attendu, cette augmentation de T_{min_m} varie de $+ 0.2$ à $+2.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Février.

Pour la station de BBA (Figure. 44.b), sous S1, des baisses des T_{min_m} sont prédites durant la période Mai- Octobre qui varie de $- 2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Octobre à $- 3.5^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, cependant pour la période Novembre- Avril, des hausses des T_{min_m} sont attendues et qui varient de $+ 2.6^{\circ}\text{C}$ au mois d'avril à $+3.6$ au mois de Janvier. Sous S2, une baisse des T_{min_m} est projetée durant la période Mai- Octobre qui varie de -1.6°C au mois de Mai à $- 2.5^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, alors qu'une hausse des T_{min_m} est prédite durant la période Novembre-Avril qui évolue de $+ 2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à $+ 4.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier. Sous S3, des baisses des T_{min_m} sont projetées durant la période Avril-Octobre qui varient de $- 0.4^{\circ}\text{C}$ au mois d'Avril à -2.3°C au mois de Juin, cependant une hausse des T_{min_m} est projetée durant la période Novembre-Février qui varie de $+ 0.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Décembre à $+ 1.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier, pour le mois de Mars aucun changement n'est prévu. Sous S4, des élévations des T_{min_m} sont prévues durant tous les mois de l'année à l'exception de mois de Mai dont une baisse légère des T_{min_m} de -0.1°C est projetée, sinon pour les 11 mois de l'année restants, des hausses des T_{min_m} sont projetées et qui varient de $+ 0.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Septembre à $+2.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Février.

Selon les projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>), aucune baisse des T_{min_m} n'est prévue durant tous les mois de l'année dans les deux stations, ainsi pour Sétif, des hausses de T_{min_m} qui varient de $+ 0.9^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier et Mars à $+1.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'aout, de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier et Février à $+2.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, de $+ 1.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Février à $+ 2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, de $+2.9^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+ 5.1^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, sont projetées sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) respectivement. Ces mêmes projections de CMIP5 prévoient pour BBA, des hausses de T_{min_m} qui varient de $+ 0.9^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier et Mars à $+ 1.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois de Février à $+ 2.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, de $+1.3^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+2.3^{\circ}$ au mois d'Aout et une hausse de $+2.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+4.2^{\circ}\text{C}$ au mois de Septembre sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) respectivement.

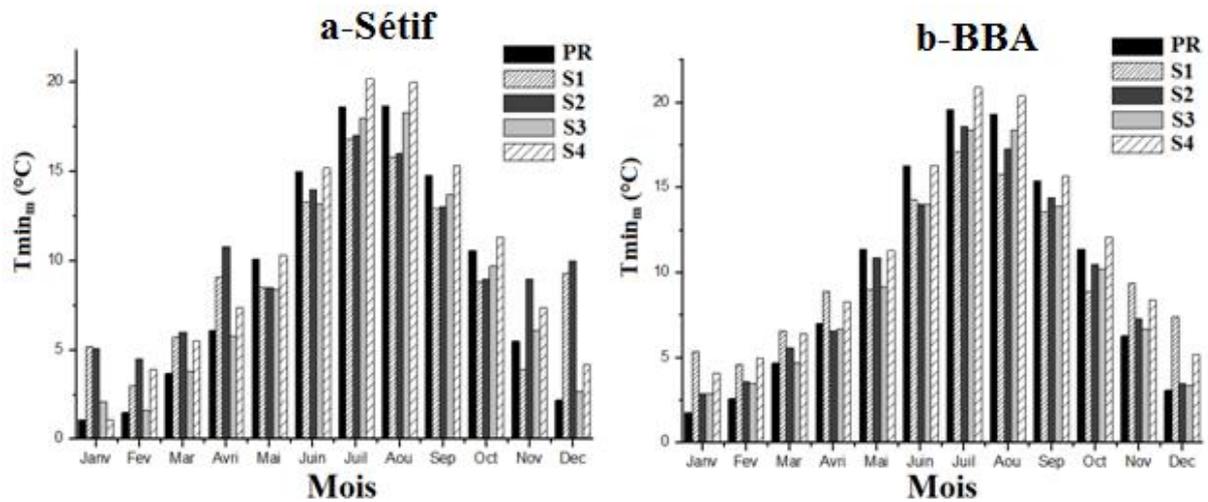


Figure 44. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{min_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

3.2.2.3 Températures moyennes

La Figure.44 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) des températures moyennes (T_{moy_m}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{moy_m} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

L'analyse de la Figure. 45.a, montre que pour la station de Sétif, la T_{moy_m} observée à Sétif est 14.2°C . Ainsi, sous les scénarios S1 et S2, les T_{moy_m} sont prévues d'augmenter durant les mois de la période de Novembre-Avril en moyenne de $+2$ et de $+2.6^{\circ}\text{C/mois}$ sous S1 et S2 respectivement, tandis que, pour les mois de la période de Mai- Octobre, les T_{moy_m} sont projetées de diminuer en moyenne de -2.3 et $-2.2^{\circ}\text{C/mois}$ sous S1 et S2 dans l'ordre. Sous le scénario S3, les T_{moy_m} sont prévues d'augmenter durant les mois de Novembre, Décembre et Janvier avec une moyenne de hausse de $+0.9^{\circ}\text{C/mois}$, cependant, pour le reste des mois de l'année, la T_{moy_m} est projetée de diminuer en moyenne de -1.5°C . Pour le scénario S4, les T_{moy_m} sont projetées d'augmenter durant les mois de la période d'Octobre- Avril en moyenne de $+1.4^{\circ}\text{C}$ alors que pour le reste des mois de l'année elle est prévue de baisser en moyenne de $-0.3^{\circ}\text{C/mois}$.

Dans le cas de la station de BBA (Figure. 45.b), la T_{moy_m} est projetée d'augmenter sous S1 et S2, durant la période de Novembre- Avril et Novembre- Mars avec une moyenne de $+1.2$ et de $+0.8^{\circ}\text{C/mois}$ respectivement sous ces deux scénarios, tandis qu'elle est projetée de baisser pour le reste des mois de l'année avec une moyenne de -2.3 et de $-1.5^{\circ}\text{C/mois}$ sous S1 et S2 respectivement. Pour le scénario S3, la T_{moy_m} est prévue d'augmenter durant les mois de la période de Novembre- Février avec une moyenne de $+0.7^{\circ}\text{C/mois}$ alors que pour les autres mois

de l'année, une baisse moyenne de la T_{moy_m} de $-1.4^{\circ}\text{C}/\text{mois}$ est prévue. Pour le scénario S4, en moyenne une hausse de la T_{moy_m} de $+1.6^{\circ}\text{C}/\text{mois}$ est projetée durant les mois de la période Octobre- Avril et durant les mois de Juillet et Août. Tandis que pour le reste des mois de l'année, une baisse moyenne de la T_{moy_m} de $-0.4^{\circ}\text{C}/\text{mois}$ est prévue.

Selon les projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>), aucune baisse de la T_{moy_m} n'est prévue durant tous les mois de l'année dans les deux stations de Sétif et BBA, ainsi des hausses de T_{moy_m} qui varient de $+0.9$ au mois de Mars à $+1.8^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, de $+1.6^{\circ}\text{C}$ au mois de Décembre à $+2.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, de $+1.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Aout, de $+3.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+5.3^{\circ}\text{C}$ aux mois de Juillet et Aout sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) dans l'ordre. Pour BBA les projections de CMIP5 prévoient des hausses de T_{moy_m} qui varient de $+1.1^{\circ}\text{C}$ au mois Janvier à $+1.8^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, de $+1.7$ au mois de Juillet à $+2.9^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août, de $+1.4^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+2.3^{\circ}\text{C}$ au mois d'Août et une hausse de $+3.1^{\circ}\text{C}$ au mois de Janvier à $+5.3^{\circ}\text{C}$ aux mois de Juillet et Août sous RCP 4.5 (2020-2059), RCP 4.5 (2060-2099), RCP 8.5 (2020-2059) et RCP 8.5 (2060-2099) respectivement.

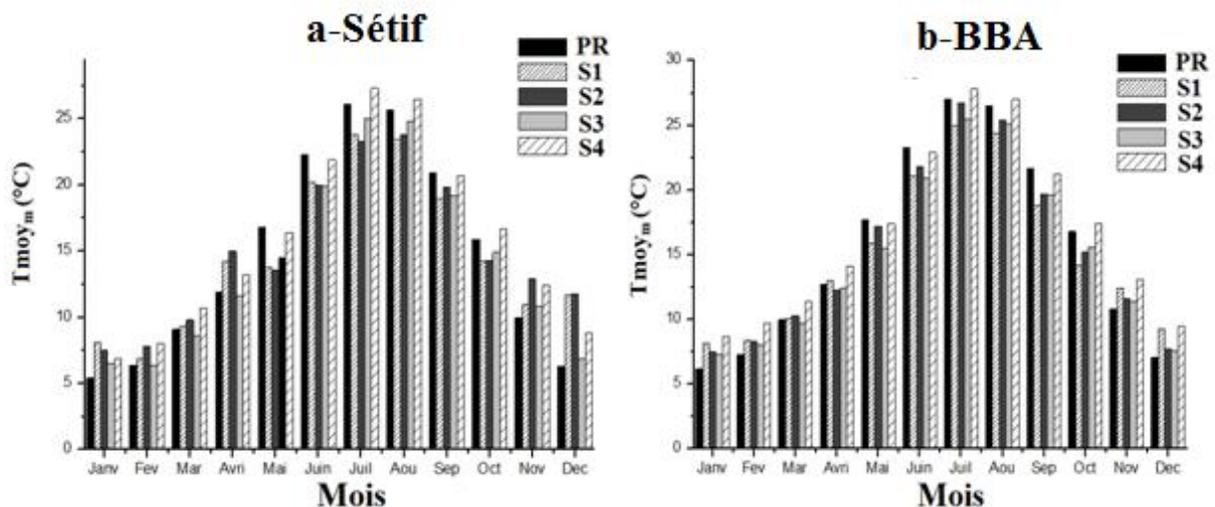


Figure 45. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{moy_m} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.2.3 Rayonnement solaire net incident

La Figure. 46 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) de rayonnement solaire net incident (R_{n_m}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux R_{n_m} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Selon la Figure. 46.a, la Rn_m est prévue de baisser durant tous les mois de l'année sous tous les quatre scénarios futurs, avec une moyenne de baisse de -6 , -6.2 , -7.2 et de -7.1 $Mj/m^2/mois$ sous les scénarios S1, S2, S3 et S4 respectivement. Aussi, selon les résultats obtenus, la Rn_m a baissé d'une manière très significative durant les mois de la période Mai-Décembre.

Dans le cas de la station de BBA (Figure. 46.b), sous S1, la Rn_m est prévue d'augmenter de $+0.33$ $Mj/m^2/mois$ et de baisser de -0.99 $Mj/m^2/mois$ durant les mois des deux périodes Octobre-Mars et Avril-Septembre respectivement. Sous S2, la Rn_m est prévue d'augmenter de $+0.43$ $Mj/m^2/mois$ durant la période Octobre-Avril, en revanche une baisse moyenne de -0.85 $Mj/m^2/mois$ est attendue pour le reste des mois de l'année. Sous S3, une diminution moyenne de Rn_m de -0.14 $Mj/m^2/mois$ est projetée au cours de la période Avril-Septembre, cependant pour le reste des mois de l'année presque aucun changement n'est projeté. Sous S4, pour les mois de Janvier, Février, Mars, Septembre et Novembre, une baisse moyenne de -0.14 $Mj/m^2/mois$ est projetée tandis que pour le reste des mois de l'année une hausse moyenne de $+0.51$ $Mj/m^2/mois$ est prévue, une exception est détectée au mois de Décembre où aucun changement n'est prévu dans la Rn_m .

Zhang et al. (2018b), ont conclu que les augmentations les plus significatives de rayonnement solaire dans les deux Amériques (de Nord et de Sud), l'Asie et l'Europe ont eu lieu en Octobre, Juin et Juillet, respectivement sous RCP 2.6 et RCP 8.5.

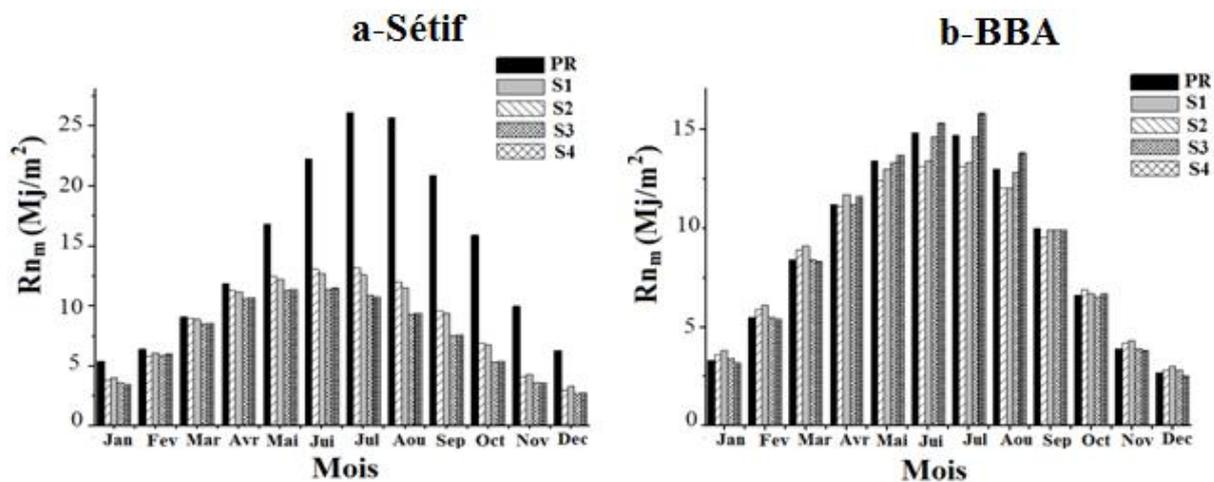


Figure 46. Comparaison des moyennes de 30 ans des Rn_m entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.2.4 Vitesse de vent

La Figure. 47 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) des de la vitesse de vent (V_m) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux V_m projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

L'analyse de la Figure. 47.a, montre que pour Sétif, la V_m est projetée d'augmenter durant tous les mois de l'année sous les scénarios S1 et S2 par rapport à PR avec une moyenne de hausse de + 4.9 et de + 4.6 m/s par mois sous S1 et S2 respectivement. Cependant sous le scénario S3 une hausse moyenne de la V_m de + 0.3 m/s est projetée durant les mois de la période Janvier- Octobre, alors que pour les mois de Novembre et Décembre, une baisse moyenne de la V_m de - 0.21 m/s est prédite. Sous le scénario S4, durant la période Janvier-Septembre, une hausse moyenne de + 0.19 m/s par mois est prévue, en revanche, pour les trois mois Octobre, Novembre et Décembre, une baisse de V_m de - 0.3 m/s par mois est attendue. Pour BBA (Figure 47.b), la V_m est prévue d'augmenter en moyenne de + 5.4 et de + 5.5 m/s par mois sous S1 et S2 respectivement, alors qu'elle est prévue de baisser en moyenne de - 0.5 et de - 0.7 m/s par mois sous S3 et S4 respectivement.

Les résultats d'autres travaux montrent que les changements mensuels futurs de la vitesse de vent varient à travers le globe ainsi à titre d'exemple, Zhang et al. (2018 a), ont déduit qu'au cours de 21^{ème} siècle, sous RCP 2.6 et RCP 8.5, pour les deux Amériques (Sud et Nord), la vitesse de vent va connaître sa baisse et son augmentation la plus importante en Janvier et Juillet, respectivement, tandis qu'en Asie et en Europe, la tendance à la baisse a été la plus marquée en Janvier et Octobre, respectivement. Autrement, Célestin et al. (2019), ont déduit qu'au Burundi en d'Afrique de l'Est, la V_m devrait augmenter sur tous les sites étudiés sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 au cours des deux périodes 2019-2040 et 2071-2100 en comparaison à la période de référence 1980-2016, ainsi ils ont prévu qu'en 2019-2040, une hausse importante de la V_m est attendue au mois d'Août sous RCP 4.5 et en mois de Septembre sous RCP 8.5, tandis qu'en 2071-2100, ces auteurs s'accordent que pour les deux scénarios, les mois de Janvier et Septembre devraient connaître le changement de la V_m le plus bas et le plus élevé respectivement.

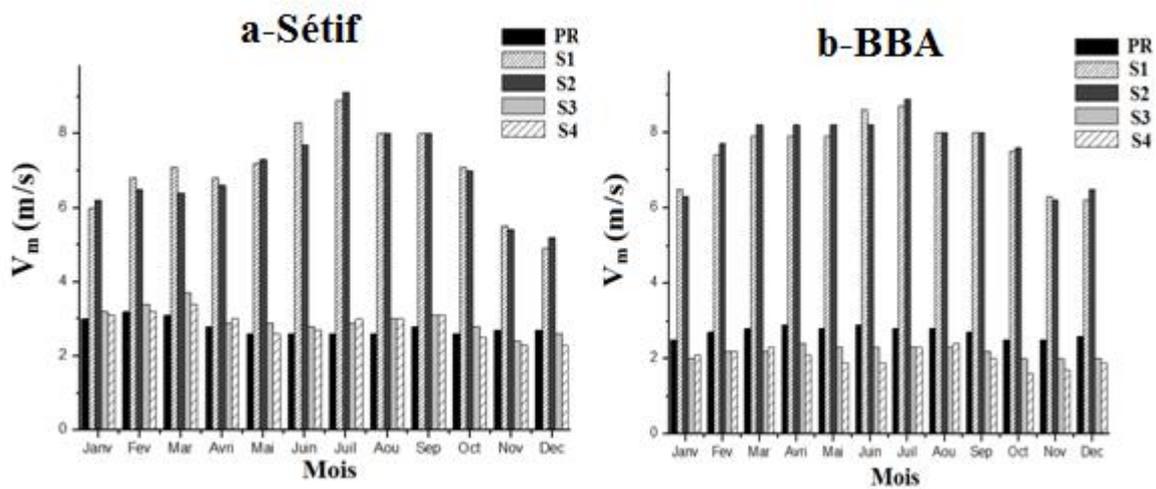


Figure 47. Comparaison des moyennes de 30 ans des V_m entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.2.5 Humidité relative

La Figure.48 montre la comparaison des moyennes mensuelles (30 ans) de l'humidité relative (Hr_m) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux Hr_m projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Selon la Figure.48.a, pour la station de Sétif, sous S1 la Hr_m devrait baisser durant les mois de Décembre, Janvier et Février avec un taux de baisse de - 10.6% par mois, pour les autres mois de l'année, en moyenne la Hr_m est prévue d'augmenter de + 29 % par mois, cette hausse est surtout remarquable durant tous les mois de la période d'avril à Septembre. Sous le scénario S2, la Hr_m est prévue d'augmenter durant tous les mois de l'année avec un taux moyen de hausse de + 6.6% par mois. Pour le scénario S3, la Hr_m devrait baisser avec un taux de baisse de - 4.2 % durant le mois de Décembre, pour le reste des mois de l'année une hausse de la Hr_m avec un taux de + 4.8% par mois est projetée. Sous S4, la Hr_m est prévue de baisser avec un taux de - 3.4% au mois de Décembre, pour les autres mois, une hausse de la Hr_m avec un taux de + 6.9 % par mois est prévue, à l'exception du mois d'Octobre dont aucun changement n'est prévu.

Pour la station de BBA (Figure. 48.b), sous S1 et S2, des diminutions de la Hr_m avec des taux de - 12 et de -11 % par mois sont projetés durant la période de Novembre à Février, en revanche une hausse de la Hr_m avec un taux de hausse de + 21 et + 22 % par mois durant la période de Mars à Octobre sous S1 et S2 respectivement, tandis que sous S3, il est projeté une hausse de la Hr_m avec un taux de + 4.1% par mois. En revanche, sous S4, une baisse de la Hr_m avec un taux de - 14.4% par mois est prévue durant la période Novembre-Avril, alors que pour le reste des mois de l'année une hausse de la Hr_m avec un taux de + 17.2% est projetée.

Les résultats sur la tendance future de la Hr_m sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, varient d'une région à une autre à travers le monde, à titre indicatif, en Corée de Sud, Li et al. (2019) ont projeté pour les deux horizons 2019–2059 et 2060–2099 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, une hausse de la Hr_m durant tous les mois de l'année sauf pour les mois de Juillet et Août, où ils ont prévu une baisse de la Hr_m . Dans l'Etat de Delaware situé dans la côte Est des États-Unis, Hayhoe et al. (2013), ont projeté pour les horizons 2020-2039, 2040-2059 et 2080-2099 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, une tendance à la hausse légère de la Hr_m durant les trois mois Juillet, Août et Septembre.

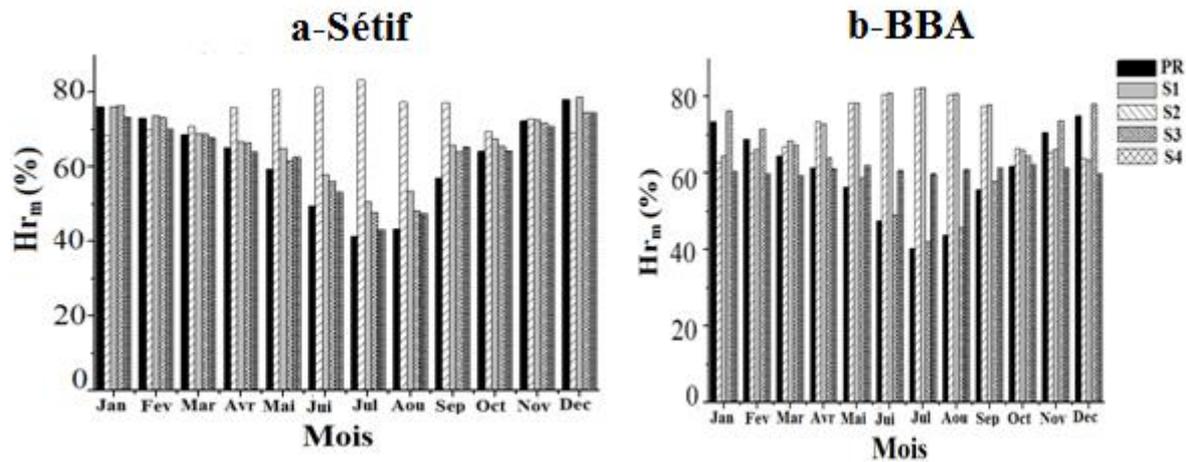


Figure 48. Comparaison des moyennes de 30 ans des Hr_m entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3 Échelle saisonnière

3.3.1 Précipitations

La Figure. 49 montre la comparaison des moyennes saisonnières (30 ans) des précipitations (P_s) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux P_s projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Selon la Figure.49.a, pour la station de Sétif, durant la PR, la P_s observée durant l'automne (P_A) est 111 mm, ainsi, la P_A est prévue d'augmenter de + 26, + 23, + 50 et de +5 % sous les scénarios S1, S2 et S3 et S4 respectivement. A Sétif, pendant la PR, la P_s observée au cours de l'hiver (P_H) est 99 mm, ce qui implique que la P_H devrait baisser de -5, - 7, - 8 et - 8 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La P_s de la saison de printemps (P_P) enregistrée à Sétif, durant la PR, est 111 mm, ainsi la P_P est projetée d'augmenter de + 19 et de + 59 % sous S1 et S3 respectivement, en revanche elle devrait diminuer de - 1 et de - 5% sous S2 et S4 dans l'ordre. La P_s enregistrée durant la PR pendant l'été (P_E) est 83.5 mm, ainsi la P_E est projetée d'augmenter sous tous les scénarios futurs de + 19.4, +26.8, + 12.4 et de + 52 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

Dans le cas de la station de BBA (Figure.49.b), la P_A observée durant la PR est 94.5 mm, elle est projetée d'augmenter de + 30, de + 20, + 50 et + 10 % sous S1, S2 et S3 et S4 respectivement. La

P_H observée durant la PR est 94.7 mm, elle est projetée de baisser de - 1, -3, -3 et de - 4 % sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre. La P_P enregistrée durant la PR est 99 mm, elle est projetée d'augmenter de +30, + 10 + 70 et de + 4 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. Durant la PR, la P_E observée à BBA est 66 mm, elle est prévue d'augmenter de + 90, + 70, + 20 et de baisser de - 1 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

Ces résultats montrent que l'augmentation des précipitations durant la saison d'été est surestimée pour tous les scénarios futurs dans les deux stations étudiées à l'exception de scénario S4 à BBA. Hadour et al. (2020) ont aussi remarqué une surestimation des précipitations estivales dans les sous-bassins de Cheliff dans le Nord-Ouest algérien vers les trois horizons 2010-2039, 2040-2069, 2070-2099 sous RCP 4.5 et RCP 8.5 en comparaison à la période historique 1970-1999. Ces mêmes auteurs ont prévu une diminution des précipitations durant l'hiver durant ces trois horizons sous les deux scénarios RCP dans les bassins de Cheliff, toutefois pour les précipitations de printemps, ils ont rapporté qu'elles devraient augmenter ou baisser selon les sous-bassins dans le futur.

Chourghal et al. (2015) ont aussi déduit une hausse significative des précipitations avec un taux de + 37% durant l'été à BBA en 2071-2100 sous le scénario SRES A1B. Au Maroc, Tramblay et al. (2013) ont déduit que la baisse des totaux saisonniers des précipitations devrait être plus significative en hiver avec un taux de baisse qui atteint - 25% en 2041–2062 sous RCP 8.5. Ce résultat est similaire au cas de la station de BBA où une baisse de P_H de - 14.7 est prévue sous S4. Autrement, selon les projections Euro-Cordex pour l'horizon 2070-2100 utilisées par Allam et al. (2020), il est prévu pour la région Sud de la méditerranée, une baisse des précipitations automnale de -5 % et -12 % sous RCP 4.5 et RCP 8.5 dans l'ordre. Ce résultat est le même obtenu pour Sétif et BBA sous S2 et S4. Ils ont aussi projeté une baisse des précipitations hivernales de - 2% sous RCP 8.5 et leur augmentation de + 25% sous RCP 4.5. Ce résultat corrobore avec celui de la station de BBA sous S3 et S4, mais pour Sétif, il confirme uniquement le résultat obtenu pour le scénario S3, car pour le scénario S4, il est projeté une augmentation de P_H . D'autre part, en Chine, Yin et al. (2019) ont rapporté que l'augmentation des précipitations au printemps et en été était relativement plus significative qu'en automne et en hiver en 2020–2045 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, cependant ils ont constaté que la hausse des précipitations saisonnières est légèrement plus importante sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5. Les résultats ci-dessus montrent que la hausse projetée des P_s est plus importante sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5 durant les saisons d'automne et de printemps à Sétif et BBA sous S1 et S3.

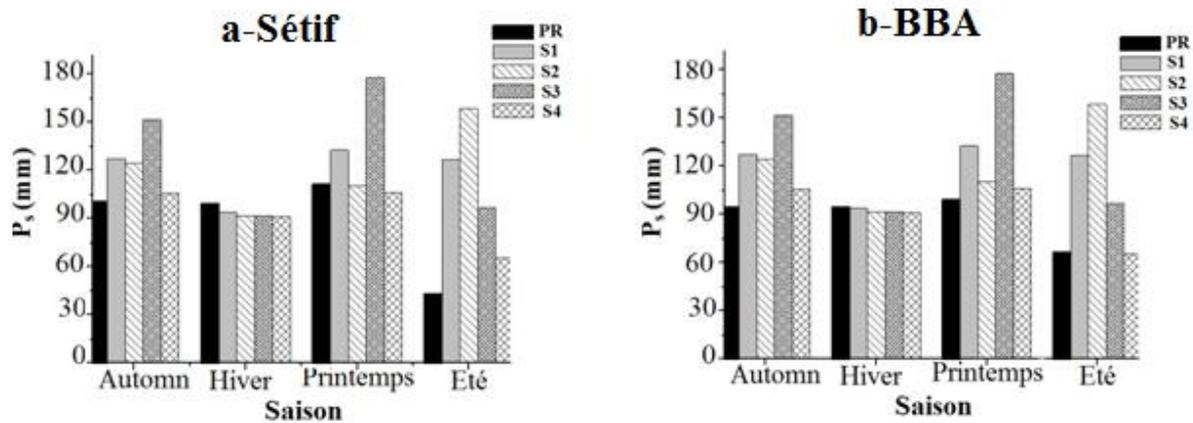


Figure 49. Comparaison des moyennes de 30 ans des Ps entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.2 Températures

3.3.2.1 Températures maximales

La Figure.50 montre la comparaison des moyennes saisonnières (30 ans) des températures maximales (T_{max_S}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{max_S} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

A Sétif (voire Figure.50.a), la T_{max_S} de l'automne (T_{max_A}) observée durant la PR est 20.9°C, elle est prévue de baisser de - 0.7 et - 0.9 sous S1 et S3 respectivement, en revanche elle est projetée d'augmenter de + 0.1 et de + 0.9°C sous S2 et S4. La T_{max_S} de la saison d'hiver (T_{max_H}) enregistrée durant la PR à Sétif est 10.4°C, elle est prévue d'augmenter de + 1.5 + 1, + 0.6 et de + 2.2°C sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre. D'autre part, la T_{max_S} de la saison de printemps (T_{max_P}) observée, au cours de la PR, à Sétif est 18.4°C, ainsi la T_{max_P} est projetée de baisser de - 1.4 °C sous S1, S2 et S3, alors que sous S4 une hausse de T_{max_P} de + 0.6°C est projetée sous S4. La T_{max_S} de la saison d'été (T_{max_E}) observée, durant la PR, à Sétif est 32°C, elle est projetée de baisser de - 2.4, - 2.9 et -2°C sous S1, S2 et S3 dans l'ordre, cependant sous S4, aucun changement de la T_{max_E} n'est prédit.

Pour la station de BBA (Figure. 50.b), la T_{max_A} enregistrée pendant la PR est 21.8°C, ainsi elle devrait baisser de - 2.2, - 1.5 et de - 1°C sous S1, S2 et S3 respectivement, tandis qu'elle est projetée d'augmenter de + 0.7°C sous S4. Pour l'hiver, la T_{max_H} observée durant la PR à BBA est 11.2°C, elle est prévue d'augmenter de + 0.2, +1.1, + 0.7 et de + 2.7°C sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La T_{max_P} enregistrée à la station de BBA durant la PR est 19.2°C, elle est projetée de baisser de - 1.4, - 0.4, - 1 °C sous S1, S2, S3 respectivement. Alors que sous S4, la T_{max_P} est projetée d'augmenter de + 0.7°C. La T_{max_E} observée au cours de la PR à BBA est

32.8°C, elle est prévue de baisser de - 1.5, - 0.2, - 2.1 et de - 0.2 °C sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre.

En comparant ces projections des températures maximales saisonnières à Sétif et à BBA aux projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>) pour ces deux stations, il ressort qu'aucune tendance à la baisse des T_{max_S} n'est prévue sur ces deux stations, au contraire des hausses des T_{max_S} sont prévues pour les quatre saisons en 2020-2059 et 2060-2099 sous RCP 4.5 et RCP 8.5.

Selon Zittis et al. (2019), les projections climatiques sous RCP 4.5 et RCP 8.5 en 2081-2100, prédisent un réchauffement de la T_{max_E} qui sera significatif dans les régions qui connaîtront probablement des sécheresses sévères dont figure quelques régions du Maghreb. Ces auteurs suggèrent que dans ces régions-là, les interactions terre-atmosphère et l'effet de diminution de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration, induite par la diminution prévue des précipitations, peut accélérer le réchauffement.

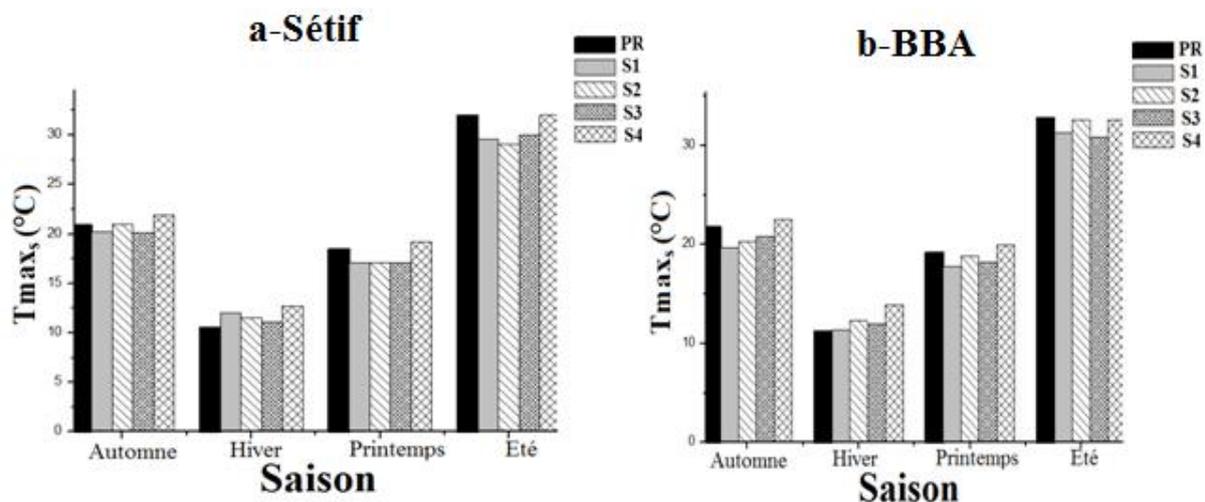


Figure 50. Comparaison des moyennes de 30 ans des T_{max_S} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.2.2 Températures minimales

La Figure. 51 montre la comparaison des moyennes saisonnières (30 ans) des températures minimales (T_{min_S}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{min_S} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

A Sétif (voire Figure.51.a), la T_{min_S} de la saison d'automne (T_{min_A}) observée au cours de la PR, est 10.3°C, ainsi la T_{min_A} est prévue de baisser de -1.8 et de - 0.5°C sous S1 et S3 dans l'ordre, cependant elle est prévue d'augmenter de + 1°C sous S4, mais sous S2 aucun changement n'est prédit. La T_{min_S} de la saison d'hiver (T_{min_H}) observée à Sétif, durant la PR, est 1.6°C, elle est

prévue d'augmenter de + 4.2, + 4.9, + 0.5 et de + 1.5°C sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La T_{min_S} de la saison de printemps (T_{min_P}) enregistrée à la station de Sétif au cours de la PR est 6.6°C, elle est prévue d'augmenter de + 1.1, + 1.8 et de + 1.1°C sous S1, S2 et S4 dans l'ordre, cependant une baisse de T_{min_P} de - 0.6°C est prédite sous S3. La T_{min_S} de la saison d'été (T_{min_E}) observée à Sétif, durant la PR, est 17.5°C, ainsi la T_{min_E} est prévue de baisser de - 2.1, - 1.8, et de -1°C sous S1, S2 et S3 respectivement, alors qu'une hausse de + 1°C de T_{min_E} est projetée sous S4.

Dans le cas de la station de BBA (Figure. 51.b), la T_{min_A} enregistrée, durant la PR est 11°C, elle est prévue de baisser de - 0.4, - 0.3 et de - 0.7°C sous S1, S2 et S3, cependant elle devrait augmenter de +1°C sous S4. Autrement, la T_{min_H} enregistrée à BBA, durant la PR est 2.5°C, ainsi elles sont prédites des hausses de + 3.3, + 0.8, + 0.8 et de + 2.3°C sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. A la station de BBA, la T_{min_P} enregistrée pendant la PR est 7.7°C, ainsi, des hausses de la T_{min_P} de + 0.5 et + 1°C sont attendues sous S1 et S4, en revanche une baisse de la T_{min_P} de - 0.8°C est projetée sous S3, pour S2 aucun changement de la T_{min_P} n'est prévu. Autrement, la T_{min_E} enregistrée à BBA pendant la PR est 18.4°C, donc des baisses de la T_{min_E} de - 2.7, - 1.8 et de - 1.5 °C sont projetées sous S1, S2 et S3 respectivement, tandis qu'une hausse de + 0.8°C est projetée sous S4.

En comparant ces projections des T_{min_S} à Sétif et à BBA aux projections de CMIP5 disponibles sur le site de la banque mondiale (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/algeria/climate-data-projections>) pour ces deux stations, il ressort qu'aucune tendance à la baisse des T_{min_S} n'est prévue sur les deux stations, au contraire des hausses de T_{min_S} sont prédites pour les quatre saisons en 2020-2059 et 2060-2099 sous RCP 4.5 et RCP 8.5.

Pour 2081-2100, Zittis et al. (2019), ont prévu une hausse des T_{min_H} qui évoluent entre + 2 à + 4°C sous RCP 4.5 et de + 3 à + 6°C sous RCP 8.5 dans la région méditerranéenne. Ce résultat est confirmé par les projections de T_{min_S} prédites pour les scénarios S2 et S4 à Sétif et à BBA. Ces auteurs, suggèrent que ce changement pourrait potentiellement être lié à des changements de la circulation atmosphérique cellulaire de Hadley qui nécessite une étude plus approfondie.

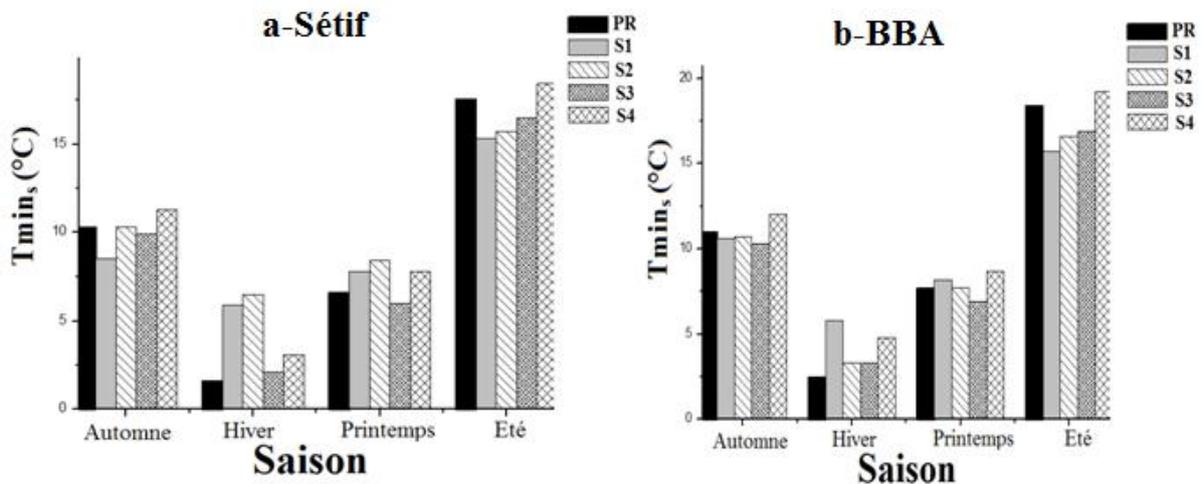


Figure 51. Comparaison des moyennes de 30 ans des Tmin_s entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.2.3 Températures moyennes

La Figure.52 montre la comparaison des moyennes saisonnières (de 30 ans) des températures moyennes (T_{moy_s}) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux T_{moy_s} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Pour la station de Sétif, l'analyse de la Figure.52.a indique que la T_{moy_s} de la saison d'automne (T_{moy_A}) enregistrée durant la PR est 15.6°C, cela implique que la T_{moy_A} est projetée de diminuer sous les scénarios futurs S1 et S3 de -1.2 et de -0.7°C respectivement, tandis que sous S4, une hausse de la T_{moy_A} de +1°C est prédite. Sous S2, aucun changement de la T_{moy_A} n'est attendu. La T_{moy_s} de la saison d'hiver (T_{moy_H}) enregistrée, durant la PR, à Sétif est 6°C, ainsi la T_{moy_H} est projetée d'augmenter de +2.9, +3, +0.6 et de +1.8°C sous les scénarios S1, S2, S3 et S4 respectivement. La T_{moy_s} de la saison de printemps (T_{moy_P}) enregistrée à Sétif, au cours de la PR est 12.6°C, cela indique que la T_{moy_P} devrait augmenter de +0.2 et de +0.9°C sous S2 et S4 dans l'ordre, en revanche des baisses de la T_{moy_P} de -0.1 et de -1°C sont projetées sous S1 et S3 respectivement. Autrement, la T_{moy_s} de la saison d'été (T_{moy_E}) enregistrée, durant la PR, à Sétif est 24.7°C, ce qui signifie que des baisses de -2.3, -2.3, -1.5 sont projetées sous S1, S2 et S3 respectivement, au moment où, une hausse de +0.5°C est prédite sous S4.

Dans le cas de la station de BBA (voire Figure.52.b), la T_{moy_A} enregistrée durant la PR est 16.4°C, elle est prévue de chuter de -1.3 sous S1 et de -0.9 sous les scénarios S2 et S3 respectivement, alors qu'une hausse de la T_{moy_A} de +0.8°C est attendue sous S4. La T_{moy_H} enregistrée à BBA au cours de la PR est 6.9°C, cela implique que cette dernière devrait augmenter de +1.8, +1, +0.8 et de +2.5°C sous S1, S1, S3 et S4 respectivement. Autrement, une T_{moy_P} de

13.5°C est observée à BBA pendant la PR, elle est projetée de diminuer de - 0.5, - 0.2 et de - 0.9 sous S1, S2 et S3 respectivement. En revanche, une augmentation de la T_{moy_P} de + 0.8°C est censée se produire sous S4. La T_{moy_E} enregistrée à BBA durant la PR est 25.6°C, ainsi des baisses des T_{moy_E} de - 2.1, -1 et de -1.8 sont projetées sous S1, S2, S3 respectivement, cependant une hausse de la T_{moy_E} de + 0.3°C est projetée sous S4.

Allam et al. (2020) ont constaté que l'augmentation de la température moyenne de l'aire dans le sud de la Méditerranée, y compris l'Algérie, d'ici 2070–2100 est plus faible en hiver et plus élevée en été sous RCP 4.5. Leurs résultats ne corroborent pas avec ceux du scénario S2 sur les deux stations étudiées car la T_{moy_H} est projetée d'augmenter tandis que la T_{moy_E} est projetée de baisser (Figures 51.a et b); cependant, sous RCP 8.5, leurs conclusions sur la tendance à la hausse de la T_{moy_E} en 2070–2100 est confirmé par les résultats de S4.

La comparaison des projections des T_{moy_S} à Sétif et à BBA à celles de El-Samra et al. (2018) sur la méditerranée orientale en 2050 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, montre que ces deux types de projections se corroborent uniquement sur la tendance à la baisse des T_{moy_P} sous RCP 8.5 (voire projection sous S3 à Sétif et BBA), sinon les projections T_{moy_S} de El-Samra et al. (2018) pour les autres trois saisons se contredisent avec les projections sous S1 et S3 à Sétif et BBA. Ainsi, ces auteurs suggèrent que la diminution des T_{moy_H} dans la région Est de la méditerranée en 2050 sous les deux scénarios RCP pourrait être liée à une réduction de la couverture nuageuse et des précipitations ce qui augmentera le refroidissement radiatif de la surface terrestre (surtout la nuit) et réduit le dégagement de chaleur latente pendant la chute des précipitations. Ainsi, selon ce raisonnement la hausse des T_{moy_H} et T_{moy_P} en 2035-2064 et 2065-2094, prévues à Sétif et BBA, pourrait être due à la hausse prévue des précipitations durant l'hiver et le printemps et donc à l'augmentation de la couverture nuageuse. En revanche, Krichak et al. (2007) ont suggéré que le refroidissement hivernal et printanier pourrait être lié au rôle des téléconnexions telles que l'Indice d'oscillation nord atlantique (ONA); l'augmentation de cet indice dans les années 1990 expliquait les plus froids et les plus secs hivers dans la région de la Méditerranée orientale

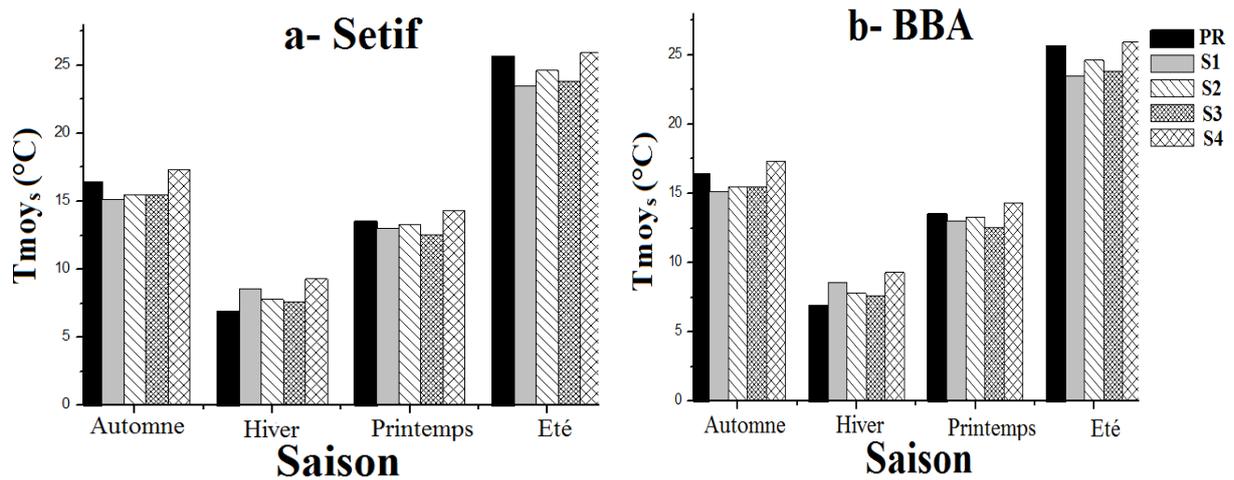


Figure 52. Comparaison des moyennes de 30 ans des Tmoy_s entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.3 Vitesse de vent

La Figure.53 montre la comparaison des moyennes saisonnières (de 30 ans) de la vitesse de vent (V_S) enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux V_S projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4

Dans le cas de la station de Sétif (Figure. 53.a), la V_S de la saison d'automne (V_A) enregistrée durant la PR est 2.7 m/s, elle est projetée d'augmenter de + 3.5, + 2.9 et de + 0.1 m/s sous S1, S2 et S3 respectivement et de baisser de - 0.1 m/s sous S4. La V_S d'hiver (V_H) observée au cours de la PR à Sétif est 3 m/s, ainsi la V_H devrait augmenter de + 2.9, + 3, + 0.1 m/s sous S1, S2 et S3 respectivement alors que sous S4, une baisse de V_H de - 0.1 m/s est attendue. La V_S de printemps (V_P) enregistrée à Sétif pendant la PR est 2.9 m/s, ce qui implique qu'une augmentation de + 3.9, + 3.5, + 0.3 et de + 0.2 m/s est prédite sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. Autrement, la V_S de l'été (V_E) observée, durant la PR est 2.6 m/s, cela indique que la V_E devrait augmenter de + 2.5, + 3.4, + 0.3 et de + 0.3 m/s sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

Pour la station de BBA (Figure. 53.b), la V_A enregistrée, au cours de la PR est 2.5 m/s, des augmentations de V_A de + 3.7 et de + 3.9 m/s et des baisse de - 0.5 et de - 0.7 m/s sont prédites sous S1 et S2 et sous S3 et S4 respectivement. La V_H observée à BBA, pendant la PR, est 2.6 m/s, elle est prévue d'augmenter de + 4.1 et de + 4.3 m/s sous S1 et S2 respectivement, cependant elle est prévue de baisser de - 0.5 m/s sous S3 et S4. La V_P enregistrée à BBA, durant la PR est 2.8 m/s, elle est projetée d'augmenter de + 4.4 et de + 4.7 m/s sous S1 et S2 et de diminuer de - 0.2 et de - 0.4 m/s sous S3 et S4 dans l'ordre. La V_E enregistrée à BBA est 2.8 m/s, elle est prédite d'augmenter de + 3.9 et de + 3.8 m/s sous S1 et S2 respectivement, tandis qu'elle est prévue de baisser de - 0.3 m/s sous S3 et S4 simultanément.

Ces résultats montrent que pour les deux stations Sétif et BBA, la V_s est prévu d'augmenter significativement sous RCP 4.5 sur quatre saisons mais particulièrement durant l'été, tandis que sous RCP 8.5, la V_s est prévue de baisser légèrement au cours des quatre saisons à BBA durant les deux horizons futurs, alors que pour Sétif, cette tendance à la baisse de la V_s est projetée uniquement pour les saisons automne et hiver, en 2065-2094.

En Amérique du Nord Jeong et Sushama. (2019), ont conclu que les augmentations futures de la V_s sont plus importantes en Hiver qu'en Eté et il en va de même pour les simulations sous RCP 8.5 que pour les simulations sous RCP 4.5. Bien que la pression au niveau de la mer soit un paramètre dominant dans le contrôle de vitesse de vent de la surface terrestre Li et al. (2010), Bichet et al. (2012) suggèrent que les changements des températures de surface de la mer, de gradient des températures méridiennes et les niveaux d'humidité en réponse au changement climatique mondial peuvent également expliquer, en partie, les changements notés sur la vitesse du vent en surface de la terre. Selon Gillett et al. (2013), les changements de pression au niveau de la mer et les changements de la circulation atmosphérique qui les accompagnent peuvent être dus à des changements régionaux des précipitations, de la température de surface, de la circulation océanique, et les concentrations de gaz à effet de serre. Par conséquent, des études plus approfondie sur la relation entre les changements projetés de la vitesse du vent en surface et des variables climatiques pertinentes sont nécessaires.

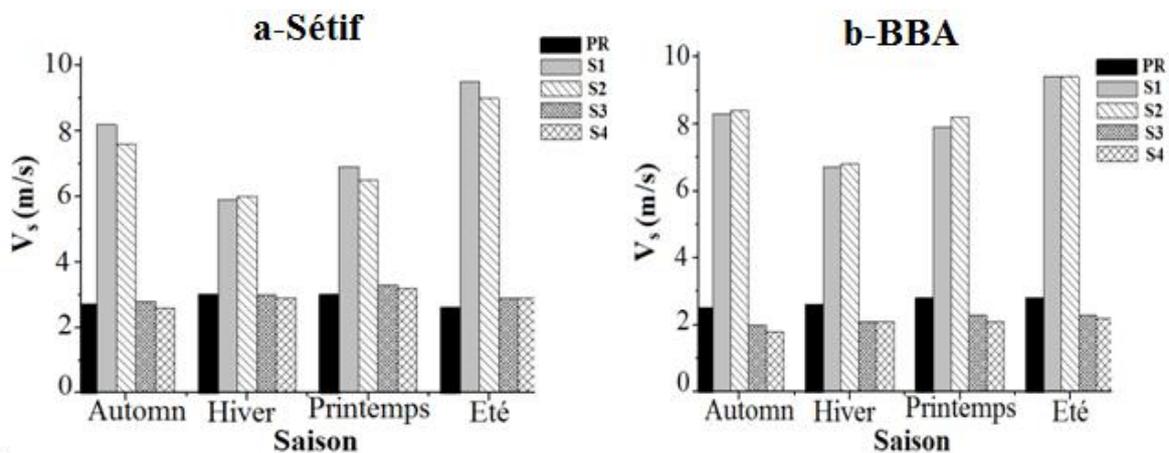


Figure 53. Comparaison des moyennes de 30 ans des V_s entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.4 Humidité relative

La Figure.54 montre la comparaison des moyennes saisonnières (30 ans) de l'humidité (Hr_s) (en %), enregistrées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux Hr_s projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4. Selon la Figure.54.a,

pour la station de Sétif, la H_{rS} observée durant l'automne (H_{rA}) pendant la PR est 64.4 %, elle est prévue d'augmenter avec des taux de +13.4, + 6.4, + 4 et + 3.6 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La H_{rS} mesurée durant la PR au cours de la saison d'hiver (H_{rH}) est 75.7%, ainsi, la H_{rH} est projetée d'augmenter avec un taux de + 0.5 % sous S2, cependant, elle est prédite de baisser avec des taux de - 9, -1 et de - 4 % sous S1, S3 et S4 dans l'ordre. La H_{rS} observée durant la PR au cours de printemps (H_{rP}) 64.3%, elle est projetée d'augmenter avec des taux de + 18, + 4.2, + 2 et de + 1 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La H_{rS} enregistrée durant l'été (H_{rE}) au cours de la PR, est 44.7%, ainsi la H_{rE} est projetée d'augmenter avec des taux de + 80, + 21, + 13 et de + 7 % sous S1, S2, S3 et S4 dans l'ordre.

Dans le cas de la station de BBA (Figure. 54.b), la H_{rA} enregistrée durant la PR est 62%, elle est prévue de baisser avec des taux de + 11.3, + 11.8 et de + 7 % sous S1, S2 et S3 dans l'ordre, cependant sous S4 une baisse de H_{rA} de - 1.5% est prédite. La H_{rH} mesurée à BBA, au cours de la PR est 72.3%, elle est prévue de baisser avec des taux de - 11, -10 et de -16% sous S1, S2 et S4 respectivement, alors que sous S3, une hausse de H_{rH} de + 4% est attendue. La H_{rP} enregistrée à BBA pendant la PR est 61%, elle est prévue d'augmenter de + 19.7, + 20.4, + 3.4 et de + 1% sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. Pareillement, la H_{rE} enregistrée à BBA, au cours de la PR, est 43%, ainsi des hausses de la H_{rE} de + 84, + 85, + 4 et de + 38% sont projetées sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

Les changements de la H_{rH} prévus à Sétif et à BBA sous RCP 8.5, confirment ceux rapportés par Collins, (2013), dans la région des hautes plaines orientales d'Algérie, car cet auteur a projeté une diminution de la H_{rH} de - 4 à - 3% en 2046-2065 et en 2081-2100 sous RCP 8.5, cependant ses résultats concernant la H_{rE} contrarient ceux projetés à Sétif et à BBA sous RCP 8.5, puisque il a prédit une diminution de la H_{rE} qui évolue entre - 3 à - 4 % à et entre - 6 à -7 % en 2046-2065 et en 2081-2100 respectivement.

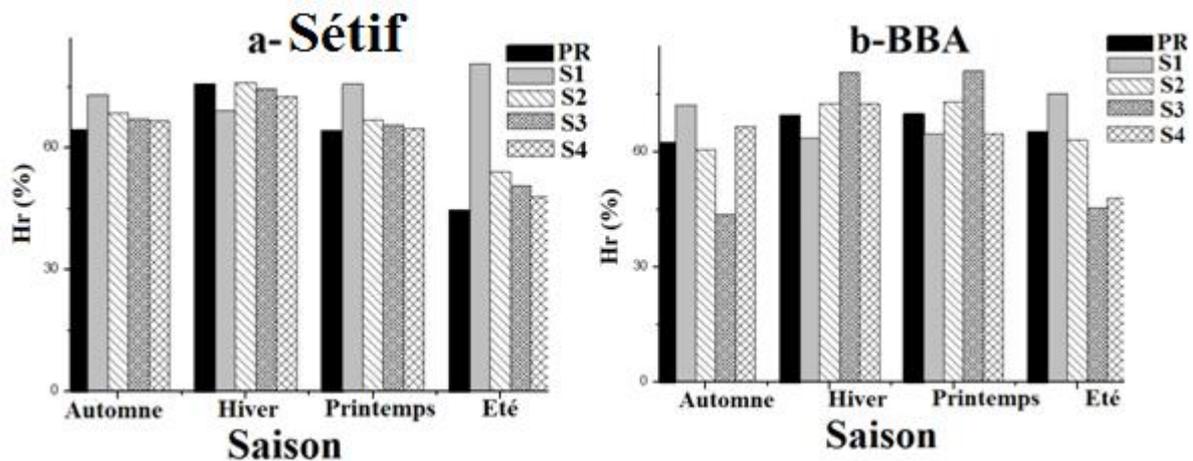


Figure 54. Comparaison des moyennes de 30 ans des Hrs entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations de Sétif et BBA

3.3.5 Rayonnement solaire net incident

La Figure.55 montre la comparaison des moyennes saisonnières (de 30 ans) de rayonnement solaire net incident (R_{nS}) observées sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA durant la PR par rapport aux R_{nS} projetées dans le futur sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

Selon la Figure.55.a, pour la station de Sétif, durant PR, la R_{nS} (Mj/m^2) enregistrée durant l'automne (R_{nA}) est $6.8 MJ/m^2$, ainsi il est prévu une hausse légère de R_{nA} de + 1 et de + 0.5% sous S1 et S2 respectivement, tandis qu'une baisse de R_{nA} de - 20 et de - 18% est projetée sous S3 et S4 dans cet ordre. La R_{nS} de la saison d'hiver (R_{nH}) observée, au cours de la PR est $3.9 MJ/m^2$, donc une augmentation de R_{nH} de + 9, + 15, + 5.7 et de + 6.1% est attendue sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. La R_{nS} de la saison de printemps (R_{nP}), enregistrée, durant la PR à Sétif, est $11.1 MJ/m^2$, elle est projetée de baisser de - 2, - 3, -9 et de - 8 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. A Sétif, la R_{nS} de l'été (R_{nE}) observée pendant la PR est $14.2 MJ/m^2$, elle est projetée de baisser de -10, -14, -26 et de -25.5 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

Selon la Figure.55.b, pour BBA, la R_{nA} observée, durant la PR, est $6.8 MJ/m^2$, dans le futur, elle est prévue d'augmenter de + 0.8, + 2.4, + 5.7 et de + 0.2% sous S1, S2, S3 et S4 respectivement. D'autre part, la R_{nH} observée à BBA, au cours de la PR, est $4.6 MJ/m^2$, elle est projetée d'augmenter de + 4.9, + 8, + 2.8 sous S1, S2 et S3, tandis que sous S4, elle est projetée de baisser de - 2.1%. Autrement, la R_{nP} observée, pendant la PR à BBA est $11 MJ/m^2$, ainsi des baisses de - 1.9 et de -0.7 sont attendues sous S1 et S3, cependant, des hausses de + 2.2 et de + 1.5 % sont projetées sous S2 et S4 respectivement. Pour la saison d'été, la R_{nE} observée durant la période historique (1981-2010) est $14.2 MJ/m^2$, elle prévu de baisser de -10.2, -8.9 et de -1.2 sous S1, S2 et S3 respectivement alors qu'une hausse de + 8.6% est projetée sous S4.

En comparant les projections de cette étude à celles de Katopodis et al. (2020), il ressort que la même tendance à la hausse de rayonnement solaire net incident durant l'hiver projetée dans les deux stations de Sétif et BBA pour l'horizon 2035-2064 est prévue aussi en Grèce en 2020-2044 sous ces mêmes scénarios. Toutefois, Ruosteenoja et Räisänen. (2013) ont projeté une hausse de rayonnement solaire net incident de 5 à 10% en Europe centrale et méridionale en 2070–2099 sous le scénario A1B (équivalent au scénario intermédiaire RCP 6), comme ils ont conclu qu'à l'exception des pays méditerranéens, le rayonnement solaire en hiver devrait diminuer dans la plupart des pays d'Europe du Nord et de l'Est de -5% à -15%.

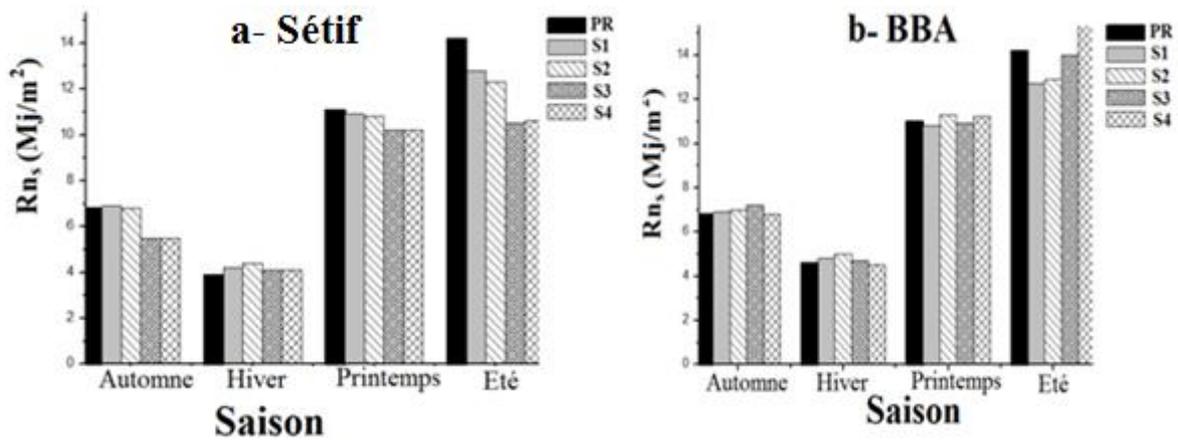


Figure 55. Comparaison des moyennes de 30 ans des Rns entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 dans les deux stations Sétif et BBA

Conclusion

L'analyse de la fiabilité des données climatiques simulées par le modèle ICHEC-KNMI pour la période de référence (1981-2010), a montré que ce modèle a simulé avec une très bonne précision les températures maximales et minimales et le rayonnement solaire net incident, cependant les précipitations sont simulées avec moins de précision, cela est due au caractère orographique des précipitations qui caractérise la région de Maghreb, ce qui rend leur prévision très compliquée.

La comparaison des moyennes annuelles, mensuelles et saisonnière des précipitations, des températures maximales, minimales et moyennes, de vitesse de vent, de rayonnement solaire net incident et de l'humidité relative, faite entre la période de référence 1981-2010 et les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, a révélé qu'un changement climatique est prévu dans Sétif et BBA qui se caractérise par :

- Une hausse des cumuls pluviométriques annuels dans les deux horizons futurs sous les deux scénarios RCP, un changement de la distribution mensuelle et saisonnière des précipitations est aussi projeté dans les deux stations étudiées, cependant les projections futures des précipitations

restent incertaines surtout durant la saison d'été où le modèle ICHEC-KNMI a surestimé les précipitations.

- Une augmentation des températures minimales du mois le plus froid (Janvier) dans les deux horizons futurs et sous les deux scénarios RCP sur les deux stations de Sétif et BBA.
- des diminutions de la température maximale du mois le plus chaud (Juillet) dans tous les scénarios futurs étudiés à l'exception de scénario RCP 8.5 (2065-2094) à Sétif, où elle est projetée d'augmenter, en revanche à BBA, elle est projetée de baisser en 2035-2065 et d'augmenter en 2065-2094 sous les deux scénarios RCP.
- à l'exception de scénario RCP 4.5 (2035-2064) où la température moyenne annuelle pourrait baisser, des hausses de cette dernière sont projetées dans trois autres scénarios futurs étudiés qui varient de + 0.1 à 1.2°C, cependant à BBA, une hausse de la température moyenne qui atteint + 0.8°C est projetée uniquement en 2065-2094 sous les deux scénarios RCP, contrairement à l'horizon 2035-2065, elle est prévue de baisser légèrement sous RCP 4.5 et RCP 8.5. A l'échelle saisonnière, le changement futur prévu dans les températures moyennes est très variable entre les deux stations.
- A Sétif comme à BBA, une baisse de cumul annuel de rayonnement solaire net incident est projetée sous les deux scénarios RCP, ceci est provoqué par la pollution induite par la hausse de la concentration des aérosols dans l'atmosphère dans les quatre scénarios futurs étudiés. Des changements dans les cumuls mensuels et saisonniers de rayonnement solaire net incident sont aussi prédits.
- La moyenne annuelle de la vitesse de vent est prévue d'augmenter dans quatre scénarios futurs étudiés à Sétif, en revanche à BBA, cette augmentation est projetée uniquement sous RCP 4.5, alors que sous RCP 8.5, une diminution de la vitesse de vent est projetée. Même à l'échelle mensuelle et saisonnière des changements de la moyenne de la vitesse sont projetés dans les deux stations.
- La moyenne annuelle de l'humidité relative est prévue d'augmenter dans les quatre scénarios futurs étudiés, cependant cette augmentation de l'humidité relative est plus significative sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5, sur les deux stations. Ces changements annuels futurs projetés de l'humidité relative sont liés aux changements mensuels et saisonniers prévus pour cette dernière.
- Les moyennes annuelles des [CO₂] sont projetées d'augmenter dans les deux scénarios RCP, cependant elles sont plus significatives sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5, et plus élevées en 2065-2094 qu'en 2035-2064. Cette augmentation future des [CO₂] dans l'atmosphère est principalement d'origine anthropique.

Chapitre VI : Évaluation de l'impact de changement climatique futur sur le rendement de blé dur pluvial dans les Hautes plaines orientales de Sétif et de BBA

1. Introduction

Selon les résultats de chapitre précédent le CC futur est confirmé à Sétif et à BBA, donc ce chapitre est consacré à simuler l'impact de CC projeté en 2035-2064 et 2065-2094, sous RCP 4.5 et RCP 8.5, sur la culture pluviale de BD dans ces deux sites expérimentaux qui appartiennent aux HPO de l'Algérie. Ainsi, ce travail de recherche vise à répondre aux questions citées ci-dessous :

- Est-ce que le modèle AquaCrop est compatible avec les conditions semi-arides des Hautes plaines orientales ?
- Comment le CC futur va affecter les dates de semis de BD ?
- Quels impacts aura le CC futur sur le rendement en grain, la WP et l'ET₀ de BD ?
- Comment le CC va influencer sur la durée de cycle de croissance (DCC) de BD ?
- Comment adapter la culture de BD au CC futur en changeant les dates de semis ?

2. Résultat de la modélisation de l'impact de CC futur sur la culture de blé dur

2.1. Evaluation de la performance du modèle AquaCrop dans la simulation des rendements de blé observés

Afin de monter la fiabilité de modèle AquaCrop dans la simulation des rendements en grain et de la biomasse d'un cultivar de BD "Mexicali", observés sur le site de la ferme expérimentale de l'INRA de Sétif, durant les trois campagnes agricoles 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013, ces rendements observés sont comparés à ceux simulés par le modèle AquaCrop, après sa calibration et sa validation. La Figure.56 montre la comparaison entre les rendements en grain et de la biomasse finaux de BD, observés au cours des trois campagnes agricoles d'essai (2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013) à Sétif et celles simulées par le modèle AquaCrop pour ces trois années.

Les rendements de BD sont simulés avec un niveau de précision acceptable pour les trois campagnes agricoles (Figure. 56.a), cependant, la simulation de la production de la biomasse aérienne est surestimée pendant la campagne 2012-2013 (Figure 56.b). Dans ce cas là, soit le modèle a surestimé la production de la biomasse, soit il y avait une erreur dans la mesure de la biomasse pendant cette campagne. Les valeurs des indicateurs statistiques RMSE, NRMSE et Willmott (d) utilisés dans cette étude, pour évaluer le degré de rapprochement entre les rendements et les biomasses de cultivar de BD "Mexicali" simulés par AquaCrop et ceux observés durant ces trois années d'expérimentation à Sétif, se situent dans la fourchette acceptable pour prédire à la fois le rendement et la biomasse, sauf pour la prévision de la biomasse pour la

campagne agricole 2012/2013 (Tableau.5). Dans l'ensemble, les indicateurs statistiques de performance du modèle étaient meilleurs dans la prédiction du rendement (RMSE = 0,41 t/ha, NRMSE = 8,81% et $d = 0,80$) que dans la simulation de la biomasse (RMSE = 2,25 t/ha, NRMSE = 21,65% et $d = 0,54$) (Tableau. 5).

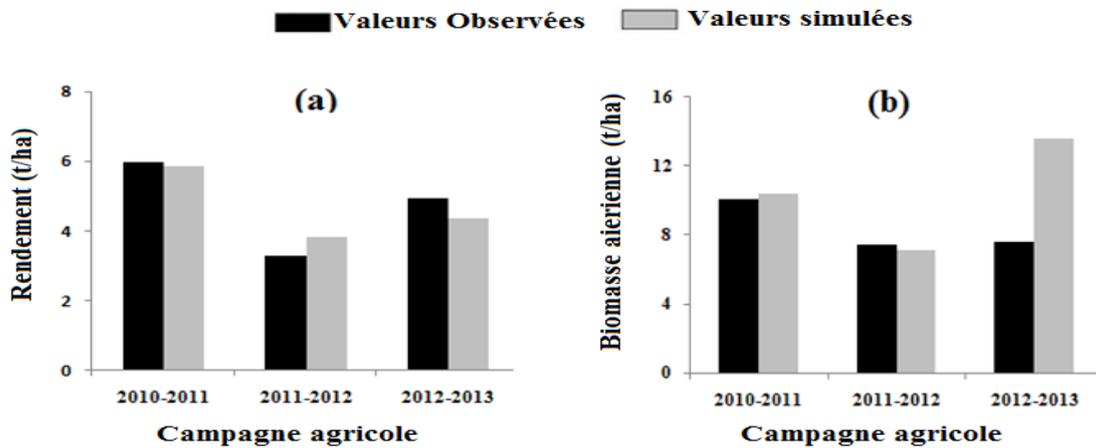


Figure 56. Comparaison des rendements en grain et de la biomasse aérienne de cultivar de BD "Mexicali" observés et simulés par le modèle AquaCrop pour les trois campagnes agricoles (2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013)

Tableau 5. Comparaison des rendements et de la biomasse aérienne de cultivar de BD "Mexicali" observés et simulés pour les trois campagnes agricoles : 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013.

Campagne agricole	RMSE		NRMSE		Willmott agreement index (d)	
	Rendement (t/ha)	Biomasse aérienne (t/ha)	Rendements (%)	Biomasse aérienne (%)	Rendement	Biomasse aérienne
2010-2011	0.12	0.38	2.60	3.67	0.99	0.64
2011-2012	0.55	0.32	11.69	3.10	0.91	0.99
2012-2013	0.57	6.04	12.14	58.18	0.49	0
Moyenne	0.41	2.25	8.81	21.65	0.80	0.54

En Chine, Iqbal et al. (2014), dans leur évaluation des simulations faites par le modèle AquaCrop des rendements en grain de blé dur (cultivé en pluvial), ont calculé un RMSE = 0,58 kg/ha et un NRMSE = 11.92% pour le rendement du blé, tandis que pour la biomasse aérienne, ils ont estimé un RMSE = 0.87 kg/ha et un NRMSE = 8.62%. Celik et coll. (2018) ont validé le modèle AquaCrop pour prédire les rendements du blé en Turquie avec un indice d'accord de Willmott (d) = 0.82, tandis que pour la biomasse aérienne, ils ont calculé un RMSE = 0.34 t/ha et un indice d'accord de Willmott (d) = 0.92.

2.2. Climat futur projeté pendant la saison de déroulement de cycle de croissance de blé dur

Les D_{CC} de cultivar de BD "Mexicali" simulées par AquaCrop pour les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA, pour la PR et pour les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 sont calculées par ce modèle, en fixant sur ce dernier une date de semis au 30 novembre. Le choix de cette date est justifié par le fait qu'elle est très pratiquée par les agriculteurs de la région d'étude durant la PR.

Dans le Tableau.6, sont comparées les moyennes saisonnières (saison qui coïncide avec la période de déroulement de cycle de croissance de cultivar de BD "Mexicali") des températures moyennes (T_{CC}), précipitations (P_{CC}), rayonnement solaire net incident (R_{nCC}) au cours de la PR et dans les horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5.

À Sétif, la moyenne à long terme (30 ans) de la T_{CC} pendant la PR est 10.3°C . Le modèle ECHEK_KNMI a prédit une augmentation de T_{CC} de $+3.5$, $+4.1$ et de $+0.6^{\circ}\text{C}$ sous les scénarios S1, S2 et S4, respectivement, mais une diminution de -0.3°C pour le scénario S3 (Tableau. 6). À BBA, le modèle ICHEK_KNMI a prédit la même tendance de la T_{CC} prédite à Sétif, ainsi des hausses de la T_{CC} de $+4.5$, $+5.7$ et de $+0.7^{\circ}\text{C}$ sous S1, S2 et S4, en revanche une diminution de T_{CC} de -0.1°C est projetée sous S3.

Selon les résultats indiqués dans le Tableau.6 ci-dessous, la hausse de la T_{CC} sous S1 et S2 est plus prononcée que sous S4 dans les deux stations Sétif et BBA, cela s'explique par le fait que sous RCP 4.5, la hausse de la température moyenne de l'aire est accentuée pendant les mois qui coïncident avec la période de déroulement de cycle de croissance du cultivar de de BD "Mexicali" (surtout les deux mois de Mars et Avril), alors que sous RCP 8.5, la hausse des températures moyennes de l'aire sera plus remarquable pendant les mois d'été et d'automne (les mois compris dans la période Juin-Octobre) qui ne coïncident pas avec la période de déroulement de cycle de croissance du cultivar de BD "Mexicali" (Figure.45 a et b).

La moyenne de P_{CC} à Sétif au cours de la PR est de 263 mm, des diminutions de -18.8 , -21.5 et de -4.4 mm correspondant à des taux de baisse de -31 , -43 et de -13 % sont projetées sous les scénarios S1, S2 et S4, respectivement, cependant une augmentation de $+65.6$ mm ($+29.2$ %) est prévue sous le scénario S3 (Tableau. 6). A BBA, le modèle ECHEK_KNMI a prédit la même tendance des P_{CC} projetées à Sétif, mais avec un degré plus accentué, ainsi des baisses de P_{CC} de -67.1 mm (-31%), -93 mm (-43%) et de -28 mm (-13%) sont projetées sous S1, S2 et S4. Alors que sous S3, une augmentation de P_{CC} de $+64.3$ mm ($+29.2\%$) est prédite par le modèle climatique.

Donc le modèle ICHEK_KNMI a prédit que BBA connaîtra également un changement de P_{CC} dans les scénarios rfuturs, mais avec une ampleur relativement plus élevée (Tableau 6).

La diminution de P_{CC} sous les scénarios S1 et S2, par rapport à la PR, dans les deux stations est attribuée au raccourcissement de la DCC de cultivar de BD "Mexicali", induite par la hausse de la T_{CC} , car les précipitations devraient augmenter pendant tous les mois de la période de déroulement de cycle de croissance de ce cultivar. La diminution de P_{CC} sous S4, par rapport à la PR, est due à la diminution des précipitations d'automne et d'hiver, en particulier des mois de la période qui s'étale de Novembre à Janvier et au raccourcissement de la DCC suite à la hausse de la T_{CC} . D'autre part, l'augmentation des précipitations printanières et l'allongement de la DCC sous S3 expliquent pourquoi la P_{CC} devrait augmenter dans ce scénario, par rapport à la PR (Tableau.6 et Figure. 46. c et d).

La Rn_{CC} sur les deux stations évolue entre 1058.9 et 1059.1 MJ/m² pendant la PR. Il devrait diminuer sur les deux stations de - 289.1 à - 633 MJ/m² sous les scénarios S1 et S2 et de - 39.8 à - 136.8 MJ/m² sous les scénarios S3 et S4 (Tableau. 6). Ces diminutions de Rn_{CC} sous les scénarios S1, S2 et S4 pourraient être dues au raccourcissement de la DCC et à la pollution par les aérosols (Mina et al., 2019), projetée sous les deux scénarios RCP, tandis que la diminution de Rn_{CC} sous S3 ne pourrait être attribuée qu'à l'augmentation de la pollution causée par les aérosols dans l'atmosphère car la DCC sera prolongée sous ce scénario.

Tableau 6. Comparaison des moyennes interannuelles de T_{CC} , P_{CC} , Rn_{CC} entre la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3, S4

Scénario de simulation	T_{CC} (°C)	Changement T_{CC} (°C)	P_{CC} (mm)	Changement P_{CC} (mm)	P_{CC} (%)	Rn_{CC} (MJ/m ²)	Changement Rn_{CC} (MJ/m ²)	(%)
Sétif								
PR	10.3		263			1059.1		
S1	13.8	3.5	244	-18.8	-7.1	712.1	- 347	- 32.8
S2	14.4	4.1	242	-21.5	- 8.2	770	- 289.1	- 27.3
S3	10	-0.3	329	65.6	24.9	922.3	- 136.8	- 12.9
S4	10.8	0.6	259	-4.5	- 1.7	857.1	- 202	- 19.1
BBA								
PR	10.7		220			1058.9		
S1	15.2	4.5	153	-67.1	- 31	468.7	- 590.2	- 55.7
S2	16.4	5.7	127	-93.8	- 43	425.1	- 633.8	- 59.9
S3	10.5	-0.1	285	64.3	29.2	1016.5	- 42.4	- 4
S4	11.5	0.8	192	-28	- 13	1019.1	- 39.8	- 3.8

2.3. Impact du changement climatique sur la date de semis

Le modèle AquaCrop permis de spécifier une date de semis selon deux critères : la température et la pluie. Pour les cultures pluviales telles que le BD, la date de semis est typiquement déterminée par des événements de la pluviométrie, cependant la spécification des dates de semis pour les

cultures de printemps dans des climats froids, c'est le facteur température de l'air qui est choisie pour déterminer ces dates (Raes. 2012), dans le cas où la date de semis est déterminée par le modèle AquaCrop, on parle d'un semis dynamique car elle change selon la pluviométrie. Ainsi dans la fenêtre de choix du critère de détermination de date de semis sur la base de la quantité de pluies, il a été recommandé au modèle AquaCrop de sélectionner une date de semis, sur la série pluviométrique qui répond à la condition de la date de première apparition d'un événement pluvieux, où s'accumule 20 mm de pluies durant 5 jours successifs. La période où devrait se réaliser cette condition a été limitée entre le 1^{er} Septembre et le 31 Décembre sur les séries pluviométriques des périodes : PR et futures (2035-2064 et 2065-2094) sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5). Les dates de semis générées par le modèle AquaCrop dans le cas d'un semis dynamique pour les deux stations Sétif et BBA sont indiquées dans le Tableau.7.

Tableau 7. Comparaison des dates moyennes de semis dynamique simulées par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4

Scénario	Sétif	BBA
PR	16-Octobre	15-Octobre
S1	17-Septembre	15-Septembre
S2	18-Septembre	17-Septembre
S3	12-Septembre	12-Septembre
S4	12-Septembre	15-Septembre

Les résultats de Tableau.7 indiquent que pour les deux stations Sétif et BBA, la date moyenne de semis pour le cultivar de BD "Mexicali", pour la PR, générée par la modèle Aquacrop et qui répond à la condition citée ci-dessus est la date de 16 et 15 Octobre, respectivement dans les sites expérimentaux de Sétif et BBA.

Pour les scénarios futurs, sur le site expérimental de Sétif, les dates moyennes de semis simulées par le modèle Aquacrop sont le 17 et le 18 Septembre sous S1 et S2, et la date du 12 Septembre sous S3 et S4. Pour BBA, les dates de semis simulées par le modèle Aquacrop sont le 15, 17, 12 et le 15 Septembre sous S1, S2, S3 et S4, respectivement. Selon ces résultats, en comparaison à la date de semis simulé pour la PR (16 Octobre) à Sétif, il est prédit sous RCP 4.5, une précocité de la date de semis de 31 et 29 jours en 2035-2064 et 2065-2094, respectivement et une précocité de 35 jours dans ces deux horizons futurs sous RCP 8.5. Pour le site de BBA, la date de semis simulée par AquaCrop est prévue d'avancer de 31, 29, 34 et 31 jours sous S1, S2, S3 et S4, respectivement par rapport à la date de semis simulé pour la PR (le 15 Octobre).

Ces résultats confirment les effets positifs de la hausse très importante des précipitations projetées durant les mois d'Août et Septembre en 2035-2064 et 2065-2094 sous RCP 4.5 et RCP 8.5, dans les deux stations de Sétif et BBA, cette hausse prédite des précipitations va aider à recharger la réserve en eau de sol ce qui a permis la réussite de semis durant l'automne. Ce même résultat est obtenu par Chourgal (2016) dans la région de BBA.

2.4. Impact de changement climatique futur sur l'échec et/ ou la réussite de semis de blé dur

L'occurrence d'un stress hydrique au cours de cycle de croissance de BD peut provoquer un échec complet (EC) de semis, ce qui correspond à la situation où le rendement est nul, cependant si le stress n'est pas trop sévère l'échec de semis est partiel (EP) et s'exprime par un rendement faible.

2.4.1 Cas d'un semis à une date fixée

La date de semis de 15 Novembre a été choisie pour simuler les rendements, avec AquaCrop, durant la PR et dans les horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094 sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Le choix de cette date vient de faite que Boufnar et Zagheraoune. (2006) ont recommandé la date de mi- Novembre à la mi-décembre pour la variété Mexicali choisie dans ce travail.

Tableau 8. Taux d'échec de semis simulé par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 avec un semis au 15 novembre.

	Sétif	BBA	Sétif				BBA			
Période	1981-2010	1981-2010	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Taux d'EP (%)	21%	55%	3%	3%	3%	3%	52%	79%	24%	31%
Taux d'ET (%)	0%	0%	0%	0%	0%	48%	0%	0%	28%	0%
Taux de réussite de semis	79%	45%	97%	97%	97%	48%	48%	21%	48%	69%

Le Tableau 8, montre les résultats de calcul de taux d'EP et d'ET de semis ainsi que le taux de réussite de semis dans les deux sites étudiés à Sétif et BBA, durant la PR et dans les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, en appliquant une date de semis de 15 novembre. Ainsi, ces résultats indiquent que pour le site de Sétif, le taux d'EP de semis est estimé à 21% cependant il n'y a pas d'années d'ET durant la PR, pour les scénarios futurs, l'EP de semis est estimé à 3% pour les quatre scénarios futurs, alors que le taux d'ET est nul sous S1, S2 et S3, cependant il est estimé à 48% sous S4.

Pour le site de BBA, l'EP de semis, durant la PR, est de l'ordre de 55% tandis que l'ET est nul, en revanche, l'EP est projeté d'atteindre 52%, 79%, 24% et 31% sous S1, S2, S3 et S4

respectivement. Alors que le taux d'ET est prévu de rester nul sous S1, S2 et S4 contrairement au scénario S3 où le taux d'ET est prévu d'augmenter de + 8%.

Donc ces résultats montrent que le taux de réussite de semis sur 30 ans est estimé à 79% à Sétif durant la PR, il est prévu d'augmenter de + 17% sous S1, S2 et S3 et de baisser de - 17% sous S4. Pour le site de BBA, le taux de réussite de semis durant PR est 45%, il est prévu d'augmenter de + 3% sous S1 et S3 simultanément et de + 24% sous S4, alors qu'il est projeté de baisser de - 24% sous S2.

2.4.2. Cas d'un semis dynamique

Les rendements de blé dur de cultivar Mexicali sont simulés par le modèle AquaCrop en appliquant les mêmes dates de semis dynamique générées par le modèle AquaCrop comme expliqué déjà dans la section précédente, ainsi le nombre d'années d'EP et d'ET dans les deux sites de Sétif et BBA, durant la PR et sous les quatre scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 sont reportés dans le Tableau.9 ci-dessous.

Tableau 9. Taux d'échec de semis simulé par AquaCrop pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 avec une date semis dynamique générée par AquaCrop

	Sétif	BBA	Sétif				BBA			
	1981-2010	1981-2010	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Nombre d'année EP	6	4	4	1	0	0	14	16	1	4
Taux EP %	21%	14%	14%	3%	0%	0%	48%	55%	3%	14%
Nombre d'année ET	1	5	0	2	1	1	3	4	3	4
Taux ET %	3%	17%	0%	7%	3%	3%	10%	14%	10%	14%
Taux de réussite de semis	76%	69%	86%	90%	97%	97%	41%	31%	86%	72%

Selon les résultats de Tableau. 9, il ressort que pour le site de Sétif, le taux de réussite de semis durant la PR, est projeté d'augmenter sous les quatre scénarios futurs S1, S2, S3 et S4, ce qui s'explique par la tendance à la baisse de l'EP et l'ET dans les scénarios futurs. Cependant pour la station de BBA, le taux de réussite de semis est projeté de baisser sous S1 et S2, ce qui est due à la tendance à la hausse de l'EP et de l'ET, alors que ce taux de réussite de semis est projeté d'augmenter sous S3 et S4 suite à la baisse projetée de l'EP et de l'ET.

La comparaison des résultats de Tableau.7 et Tableau.8, indique que le taux de réussite à Sétif est plus élevé avec un semis à date fixée au 15 Novembre sous S1 et S2, alors que sous le scénario S3, le taux de réussite de semis est le même (97%) entre un semis dynamique et un semis à date fixée au 15 Novembre, en revanche pour le scénario S4, le taux de réussite de semis est plus élevé avec un semis dynamique. Par contre pour BBA, généralement le taux de réussite de semis

est plus élevé avec un semis dynamique, à l'exception de scénario S1 où le taux de réussite de semis est plus élevé avec un semis à une date fixée au 15 Novembre.

Dans les conditions climatiques projetées, d'une manière générale, un semis dynamique qui est précoce au mois de Septembre et Octobre, permet à la culture de BD de profiter des bonnes conditions hydriques de sol, durant le semis, ce qui permet une bonne installation de plant de blé, qui peut profiter de la hausse des précipitations projetée durant les mois d'Août, Septembre et Octobre, tandis qu'un semis fixée, à la date du 15 Novembre, améliore les conditions hydriques de sol durant la période de formation des grains de BD au printemps où une hausse des précipitations est projetées (voire Figure.42)

2.5. Evaluation de l'impact de changement climatique futur sur la culture de blé dur pluvial

Sur le Tableau.10 ci-dessous, sont indiqués pour la PR et pour les quatre scénarios futurs (S1, S2, S3 et S4) les moyennes interannuelles : des rendements en grain de blé dur (q/ha), de l' ET_0 (mm), et de la WP de cultivar de BD "Mexicali".

2.5.1 Projections des rendements de blé dur dans les scénarios futurs de changement climatique

Selon les résultats indiqués dans le Tableau. 10, ci-dessous, pour les deux sites de Sétif et BBA, en comparaison aux rendements simulés pour la PR, le modèle AquaCrop a prédit une augmentation des rendements de cultivar de BD "Mexicali", cultivé en sec (pluvial), dans les quatre scénarios futurs, cette hausse des rendements varie entre + 7.8 à + 135%. Le rendement moyen simulé pour la PR à Sétif est 34.7 q/ha. Par rapport à ce dernier, des hausses de + 2.84, + 3.3, + 2.7 et de + 4.1 q/ha correspondant à des taux de hausse de + 82, + 94.7, + 76.7 et de + 117.8% sont projetées sous les scénarios S1, S2, S3 et S4, respectivement. Pour le site expérimental de BBA, le rendement simulé pour la PR est estimé à 23.3 q/ha, il est projeté d'augmenter de + 37.2, + 2, + 31.1 et de + 31.5 q/ha correspondant à des taux de hausse de + 16, + 7.8, + 133.4 et de + 135.1% dans les scénarios S1, S2, S3 et S4, respectivement.

Tableau 10. Comparaison des moyennes de 30 ans des rendements, de l'ET₀, WP, date de maturité de grain et de la D_{CC} entre la PR et les scénarios S1, S2, S3 et S4

Scénario de simulation	Rendement (q/ ha)	Changement rend (q/ha) (%)		ET ₀ (mm)	Changement ET ₀ (mm) (%)		WP (kg/m ³)	Changement WP (kg/ m ³) (%)		Maturité de grain du blé	D _{CC} (jours)
Sétif											
PR	34.7			562.5			1			08-Mai	161
S1	63.1	28.4	82	444.9	-118	-20.9	2	1	100	08-Avr	131
S2	67.6	32.8	94.7	412.7	-150	-26.6	2.2	1.2	120	02-Avr	125
S3	61.3	26.6	76.7	530.2	-32.3	-5.7	1.6	0.6	60	18-Mai	171
S4	75.6	40.9	118	491.2	-71.3	-12.7	2.3	1.3	130	06-Mai	159
BBA											
PR	23.3			542.8			0.7			28-Avr	151
S1	27	37.2	16	484.2	-58.6	-10.8	1	0.3	43	12-Mars	104
S2	25.1	1.8	7.8	482.7	-60.1	-11.1	1.1	0.4	57	05-Mars	97
S3	54.4	31.1	133	496	-46.8	-8.6	1.6	0.9	129	11-Mai	164
S4	54.8	31.5	135	468.2	-74.6	-13.7	2	1.3	186	25-Avr	148

2.5.2 Projections de l'évapotranspiration de référence dans les scénarios futurs de changement climatique

Les résultats indiqués sur le Tableau. 10, montrent que pour le site expérimental de Sétif, la moyenne de 30 ans de l'ET₀ (cumul de toute la saison de déroulement de cycle de croissance de cultivar de BD Mexicali), qui est calculée par le logiciel ET₀ calculator, pour la PR est 562.5 mm, elle est prévue de baisser de - 117.6, - 149.8, - 32.3 et - 71.3 mm correspondant à des taux de diminution de - 20.9, - 26.6, - 5.7 et de -12.7 % sous les scénarios S1, S2, S3 et S4 respectivement. De même, au site expérimental de BBA, la moyenne de l'ET₀ simulée pour la PR est 542.8 mm, elle est projetée de baisser de - 58.6, - 60.1, - 46.8 et de - 74.6 mm correspondant à des taux de baisse de - 10.8, - 11.1, - 8.6 et de - 13.7 % sous S1, S2, S3 et S4 respectivement.

2.5.3 Projections de la productivité de l'eau de blé dur dans les scénarios futurs de changement climatique

Selon les résultats de Tableau. 10, pour le site expérimental de Sétif, le modèle AquaCrop a prédit une moyenne de 1 kg/m³ de la WP de cultivar de BD "Mexicali" pour la PR, ainsi il a prédit des hausses de + 1, + 1.2, + 0.6 et de + 1.3 kg/m³ correspondant à des taux de hausse de + 100, + 120, + 60 et de + 130% pour les scénarios S1, S2, S3 et S4, respectivement. Pour le site expérimental de BBA, la moyenne de la WP de blé simulée par le modèle AquaCrop pour la PR est 0.7 kg/m³, ainsi la WP est prévue d'augmenter de + 0.3, + 0.4, + 0.9 et de + 1.3 correspondant à des taux de hausse de + 43, + 57, + 129 et de + 186 %, respectivement sous les scénarios S1, S2, S3 et S4.

2.5.4 Projections futures des rendements de blé dur

Sur le Tableau.11, sont indiqués les résultats de test de corrélation de Pearson, ce test est réalisé entre les séries chronologiques de 30 ans, des rendements de cultivar de BD " Mexicali", qui sont simulés par le modèle AquaCrop pour la PR et pour les quatre scénarios futurs S1, S2, S3 et S4, et les séries chronologiques de 30 ans des T_{CC} , P_{CC} et Rn_{CC} , qui sont observées durant la PR et projetées par le modèle climatique ICHEC_KNMI dans les quatre scénarios futurs étudiés.

Ainsi selon ces résultats indiqués dans le Tableau.11, il ressort que pour le site expérimental de Sétif, il y a une corrélation négative et statistiquement significative ($P\text{-value} < 0.05$) entre les rendements simulés de BD et la T_{CC} dans tous les scénarios à l'exception de scénario de la PR (Tableau. 11). À BBA, il y a une corrélation négative non significative ($P\text{-value} > 0.05$) entre la T_{CC} et le rendement du BD au cours de la PR et dans les scénarios futurs. En revanche, sur les deux sites, la corrélation du rendement du BD avec P_{CC} et Rn_{CC} est positive et statistiquement significative dans tous les scénarios.

Tableau 11. Résultats de test de corrélation de Pearson, appliqué entre les séries de 30 ans, des rendements de cultivar du BD «Mexicali», simulés par AquaCrop et les séries de 30 ans des T_{CC} , P_{CC} et de Rn_{CC} observées durant la PR et projetées sous les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4.

Site expérimental	Scénario de Simulation	T_{CC}		P_{CC}		Rn_{CC}	
		R	P-value	R	P-value	R	P-value
Sétif	PR	-0.35	0.06	0.76	1.9×10^{-6}	0.75	2.9×10^{-6}
	S1	-0.52	0.004	0.80	2.2×10^{-7}	0.75	2.5×10^{-6}
	S2	-0.46	0.01	0.73	7.3×10^{-7}	0.59	6.8×10^{-4}
	S3	-0.52	0.004	0.80	2.2×10^{-7}	0.68	4.7×10^{-5}
	S4	-0.46	0.01	0.73	7.3×10^{-6}	0.73	6.8×10^{-6}
BBA	PR	-0.06	0.74	0.79	3.3×10^{-6}	0.58	8.7×10^{-4}
	S1	-0.27	0.16	0.76	1.7×10^{-6}	0.78	5.3×10^{-7}
	S2	-0.06	0.74	0.68	4.5×10^{-5}	0.62	2.9×10^{-4}
	S3	-0.27	0.16	0.76	1.7×10^{-6}	0.78	4.2×10^{-7}
	S4	-0.06	0.74	0.68	4.5×10^{-5}	0.41	0.02

2.5.5 Impact de changement climatique projeté sur la durée de la durée de cycle de croissance du blé dur

Selon les résultats du Tableau. 10, la moyenne de 30 ans de la D_{CC} (jour) de cultivar de BD "Mexicali", simulée par le modèle AquaCrop pour le site expérimental de Sétif, pour la PR, est 161 jours, ainsi la moyenne de la D_{CC} est prédite par AquaCrop de se raccourcir de 30, 36 et de 2 jours sous S1, S2 et S4, respectivement, cependant elle est projetée de se prolonger de 10 jours sous S3. Pour le site de BBA, pour la PR, AquaCrop a prédit une moyenne de D_{CC} de

151 jours, il a prédit la même tendance de la moyenne de la D_{CC} projetée au site de Sétif pour les scénarios futurs, ainsi des raccourcissements de la D_{CC} de cultivar de BD "Mexicali" de 47, 54 et de 3 jours sont projetés sous S1, S2 et S4, respectivement, cependant un prolongement de la D_{CC} de 13 jours est prévu sous S3.

Le Tableau. 12 montre les résultats de test de corrélation de Pearson établi entre les séries chronologiques de 30 ans des rendements de cultivar de BD "Mexicali", simulés par le modèle AquaCrop pour la PR et sous les quatre scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 et les séries chronologiques de 30 ans de P_{CC} et T_{CC} de la PR et des quatre scénarios futurs.

Sur les sites expérimentaux de Sétif et de BBA, la corrélation entre la D_{CC} et la T_{CC} est négative et statistiquement significative (p -value < 0,05) pendant la PR et dans tous les scénarios futurs (Tableau. 12), sauf dans le scénario S1 à BBA. En revanche, sur les deux sites expérimentaux, la corrélation entre la D_{CC} et les P_{CC} est positive et statistiquement significative pendant la PR et dans quatre scénarios futurs.

Tableau 12. Résultats de test de corrélation de Pearson appliqué entre les séries chronologiques de D_{CC} de cultivar de BD "Mexicali" (simulées par AquaCrop) et les séries de 30 ans de T_{CC} et P_{CC} observées durant la PR et celles projetées dans les quatre scénarios futurs.

Site	Scénario de simulation	T_{CC}		P_{CC}	
		R	P-value	R	P-value
Sétif	PR	-0.57	1.3×10^{-3}	0.73	7.93×10^{-6}
	S1	-0.82	1.3×10^{-6}	0.64	2×10^{-3}
	S2	-0.92	3.3×10^{-13}	0.47	0.01
	S3	-0.58	1.1×10^{-3}	0.77	1×10^{-6}
	S4	-0.64	1.8×10^{-4}	0.72	8.83×10^{-6}
BBA	PR	-0.46	1.2×10^{-2}	0.82	4×10^{-8}
	S1	-0.42	2.3×10^{-2}	0.81	1×10^{-7}
	S2	-0.27	0.15	0.60	5.33×10^{-4}
	S3	-0.63	2.3×10^{-4}	0.73	7.11×10^{-6}
	S4	-0.71	1.4×10^{-5}	0.54	2.4×10^{-3}

2.6 Adaptation de la culture de blé dur au changement climatique futur par le choix d'une date de semis

Pour choisir une date de semis qui permis de meilleurs rendements de BD dans les scénarios de CC futurs, cinq dates de semis : 15 Septembre, 15 Octobre, 15 Novembre, 30 Novembre et 15 Décembre sont appliquées pour simuler avec AquaCrop, les rendements de cultivar du BD "Mexicali" pour la PR et pour les quatre scénarios de CC futur. Sur les graphes de la Figure. 57,

sont portées les moyennes des rendements de ce cultivar simulées par le modèle AquaCrop, en le tournant avec chacune des cinq dates de semis citées ci-dessus, pour la PR et pour chacun des quatre scénarios futurs de CC.

Ainsi, selon les résultats indiqués dans la Figure. 57, le rendement de BD simulé en appliquant les cinq dates de semis varie considérablement. Le rendement simulé pour un semis au 30 Novembre (Tableau.9 de la section 2.5.1) est le rendement de de la PR, car c'est la date de semis généralement pratiquée par les agriculteurs des HPO de l'Algérie. Sur les deux sites expérimentaux, la date de semis du 15 Octobre a abouti au meilleur rendement pendant la PR et dans les quatre scénarios futurs (Figure. 57 a et b) car elle permet au plant de BD de recevoir un volume de précipitations élevé pendant sa phase de développement végétatif qui se déroule dans la période qui s'étale de mois de Novembre au début du mois de Février.

De plus, les semis à la mi- Octobre permettent le déroulement de la floraison entre fin Février et le début du mois d'Avril, échappant ainsi aux températures élevées au cours des deux mois de Mai et Juin. Le deuxième meilleur rendement a été obtenu pour les semis du 15 Septembre dans tous les scénarios futurs à l'exception du scénario S3 à Sétif, dont le deuxième meilleur rendement a été obtenu avec un semis au 15 Novembre (Figure. 57.a).

Cependant, le rendement simulé avec une date de semis du 15 Septembre est légèrement médiocre en raison de l'influence négative de la baisse des précipitations au stade de développement végétatif du blé (au cours des mois de Novembre et Décembre) par rapport aux semis du 15 Octobre. Les semis tardifs de la mi- Novembre à la mi- Décembre ont abouti à des rendements médiocres en raison de la température élevée qui persiste au stade de la floraison et remplissage des grains qui aura lieu à la mi- Avril jusqu'au début du mois de Juin.

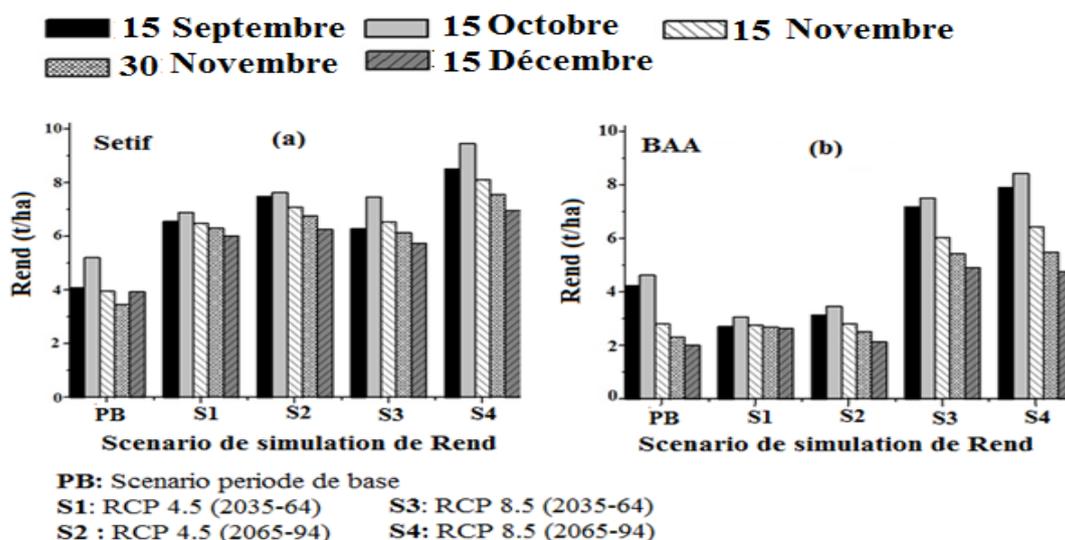


Figure 57. Variation des rendements de cultivar de BD "Mexicali" selon les dates de semis pour la PR et les scénarios futurs S1, S2, S3 et S4 sur les deux sites Sétif et BBA.

3. Discussion des résultats des simulations des rendements futur de blé dur

3.1 Projections futures des rendements de blé dur

Sachant que les rendement de BD simulés par le modèle AquaCrop pour la PR estimé à 28.4 et 23.3 q/ha à Sétif et BBA, respectivement et que des gains de rendement sont prédits par AquaCrop et estimés à (+ 82 et + 16), (+ 94.7 et + 7.8), (+ 76.7 et + 133) et (+188 et + 135) % , sous les scénarios futurs de CC: S1, S2, S3 et S4, respectivement sur les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA.

Ainsi, la lecture de ces résultats indique que les rendements du BD projetés sous RCP 8.5 sont meilleurs que ceux prédits sous RCP 4.5, à l'exception de l'horizon 2035-2064 sous RCP 4.5, où le rendement de BD est plus élevé sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5 au niveau du site expérimental de Sétif. Ces gains de rendements dans les scénarios futurs sont dus à l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂, projeté dans les quatre scénarios futurs. Car la [CO₂], durant la PR, est estimée à 362 ppm, elle est projetée d'atteindre 484.1, 529, 542 et 756 ppm dans les scénarios futurs de CC : S1, S2, S3 et S4, dans cet ordre. Ainsi, l'effet fertilisant de la hausse de la [CO₂], sur les rendements futurs de BD prédits par AquaCrop à Sétif et BBA, est aussi confirmé par le fait que les rendements simulés sont généralement plus élevés en 2065-2094 qu'en 2035-2064, mise à part, sous RCP 4.5 à BBA, où le rendement projeté est meilleur en 2035-2064 qu'en 2065-2094.

Ces résultats sont compatibles avec les conclusions des études récentes de Rashid et al. (2019), Karimi et al. (2018), Bouras et al. (2019), Yeşilköyb et Şaylan (2020) et Ghulami (2017) menées, respectivement en Chine, États-Unis, Maroc, Turquie et en Afghanistan, ces études ont démontré que l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ vers la fin du 21ème siècle, sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 est la cause principale de l'amélioration des rendements futurs de blé. De même, Pugh et al. (2016) ont rapporté que le blé pluvial dans les régions arides et semi-arides et situées dans les basses latitudes bénéficierait de l'effet fertilisant du CO₂, mais moins dans les régions tempérées situées dans les hautes latitudes. Aussi, Long et al. (2006) ont rapporté qu'une concentration élevée de CO₂ de 550 ppm dans les expériences de dispositif d'enrichissement en CO₂ à l'air libre, dénommé FACE (Free-Air Concentration Enrichment en anglais) et dans des expériences en chambre fermée a entraîné un gain de rendement de blé de + 31 et + 13%, respectivement dans ces deux dispositifs expérimentaux. Tubiello et al. (2007a) et Long et al. (2006), ont suggéré que les effets fertilisant d'une concentration en CO₂ élevée pourraient être surestimés dans les modèles de culture, parce que leur simulation de l'amélioration du rendement par une concentration élevée de CO₂ était beaucoup plus grande que celle observée dans les études FACE, toutefois ils ont suggéré que l'ampleur de ces effets est toujours en débat.

Cependant, dans une expérience FACE, Erbs et al. (2010) ont constaté que la teneur en protéines brutes du grain de blé diminuait de - 4 à - 13% sous une concentration en CO₂ élevée.

L'enrichissement en CO₂ projeté sur les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA dans les quatre scénarios futurs de CC étudiés, compense les effets négatifs, sur le rendement de BD, de l'augmentation de la T_{CC} et de la diminution du P_{CC} projetées sous les scénarios S1, S2 et S4 (Tableaux. 6 et 9), et compense aussi l'effet négatif de la baisse du R_{nCC} sur le rendement de BD dans tous les scénarios futurs (Tableaux. 6 et 9).

Xiao et al. (2018), ont également déduit que l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ ralenti les effets négatifs du réchauffement des températures de l'air et de la diminution des précipitations sur le rendement de blé, sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, au début du 21ème siècle en Chine. De même, Xiong et al. (2012) ont constaté que l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ augmentait le rendement du blé de + 0.9 % en compensant l'effet négatif de la diminution du rayonnement solaire, mais sans cet effet fertilisant du CO₂, le rendement du blé diminuerait de - 9.7%.

Toutefois, ce gain en rendement de blé avec l'effet fertilisant de CO₂ est accompagné d'une perte de la valeur nutritive de grain de blé (Wu et al., 2004). Myers et al. (2014) ont révélé que le blé cultivé dans des FACE avec une concentration en CO₂ de 546–586 ppm, perd -9.3, -5.1 et - 6.3% de sa teneur en zinc, fer et protéine en comparaison à un blé cultivé dans un milieu à une concentration en CO₂ ambiante.

Cependant, les résultats de cette étude ne corroborent pas avec les conclusions de Gharibdousti et al. (2019), Paymard et al. (2019) et Hernandez-Ochoa et al. (2018), qui ont conclu que l'effet de fertilisant de CO₂ ne peut pas éviter totalement la baisse de rendement du blé, induite par les effets négatifs du CC projetés (réchauffement de la température, baisse des précipitations,... etc.) vers la fin du 21ème siècle, sous ces mêmes scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, aux États-Unis, en Iran et au Mexique, respectivement.

Le fait que le rendement de BD simulé pour l'horizon 2035-2064 à Sétif est légèrement plus élevé sous RCP 4,5 que sous RCP 8,5, peut être induit à l'effet négatif sur le rendement du BD de la baisse de la T_{CC} de - 0,3°C, en dépit de l'enrichissement en CO₂. De même, Tan et al. (2018) ont rapporté qu'une température relativement plus basse entre la fin de la dormance et les stades d'enthèse, au Nord de la Chine, réduisait le taux de croissance et affaiblissait l'effet stimulant d'une [CO₂] élevée sur la photosynthèse de la culture de blé. Ainsi, l'effet fertilisant d'un enrichissement de l'atmosphère en CO₂ sur le rendement de blé est stimulé par l'augmentation des températures sur les deux sites dans trois scénarios S1, S2 et S3. Ce résultat confirme les résultats de Sage et al. (1995) et Nonhebel (1996) qui ont prouvé que la stimulation de la photosynthèse avec un enrichissement en CO₂ dans l'atmosphère s'accroît avec la hausse de la température. En

Chine, Rashid et al. (2019) ont rapporté que le réchauffement prévu à la fois dans le cadre du RCP 4.5 et du RCP 8.5, atténuerait le stress des basses températures sur la production de biomasse de blé.

Les taux d'augmentation de rendement de BD, dans les scénarios S1 et S2, sont plus élevés à Sétif qu'à BBA. Cela pourrait être provoqué par les effets néfastes combinés de la baisse remarquable de la P_{CC} de - 31 et - 43% et de l'augmentation significative de la T_{CC} de + 4.5 et + 5.7°C à BBA, sous les scénarios S1 et S2, respectivement. L'effet combiné des sévères stress thermique et hydrique, projetées à BBA, pourrait être à l'origine de la diminution de l'effet positif de l'enrichissement de l'air en CO_2 sur le rendement de BD sous ces deux derniers scénarios. Ainsi, à BBA et sous RCP 4.5, le fait que le rendement de BD est meilleur en 2035-2064 qu'en 2065-2094, en dépit que la $[CO_2]$ est plus élevée dans ce dernier horizon lointain que dans l'horizon proche, pourrait être due à la hausse importante de la T_{CC} de + 5.7°C et la baisse remarquable de la P_{CC} de - 43% en 2035-2064 sous RCP 4.5 en comparaison à la PR, ces stress thermique et hydrique accentués ont dû freiner l'effet fertilisant d'une $[CO_2]$ élevée sur les rendements de BD pluvial à BBA.

De même, Xu et al. (2013), ont rapporté que la stimulation du rendement de blé suite à une hausse de la $[CO_2]$ pourrait être supprimée, sous diverses contraintes climatiques, et/ou environnementales néfastes, telles que l'effet séparé de la sécheresse ou des températures élevées et/ou leur combinaison. Conjointement, Attri et Rathore (2003), ont démontré que l'enrichissement de l'air en CO_2 pourrait atténuer les effets négatifs d'une sécheresse modérée, par la réduction de la conductance stomatique et de la surface foliaire et par la régulation de l'expression des gènes. Fitzgerald et al. (2016) dans une expérience FACE caractérisée par un passage d'une $[CO_2]$ de 350 ppm vers une $[CO_2]$ de 550 ppm, dans un milieu aride en Australie, ont déduit une stimulation de la production de blé tendre qui varie de + 24% à + 53% dans deux sites différents,. Ils ont aussi révélé que l'enrichissement de l'air en CO_2 permet d'atténuer les effets négatifs des vagues de chaleur et de stress hydrique sur le rendement de blé tendre.

3.2 Mécanisme de l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en CO_2

Selon Bowes. (1991), une disponibilité en $[CO_2]$ atmosphérique significative conduit à une augmentation de la vitesse de photosynthèse foliaire des plantes en C3 (telles que : le blé). Cette augmentation est principalement due à la régulation par le CO_2 de la carboxylase-oxygénase (RuBisCO), enzyme qui catalyse les entrées de CO_2 dans le système photosynthétique (Figure. 58. a) Ainsi, pour une plante C3, une $[CO_2]$ élevée, sa fonction carboxylase est accrue (photosynthèse brute) et sa fonction oxygénase (photorespiration) est diminuée. Dans des conditions optimales d'humidité, de température, de lumière et d'éléments nutritifs, l'augmentation

d'activité photosynthétique peut être responsable d'environ 20 à 50 % de gain de productivité des cultures (Kimball, 1983). Cependant, les plantes en C₄ (telles que le maïs), moins dépendantes pour leur photosynthèse de la [CO₂] externe à la feuille, grâce à leur système de régulation de [CO₂] au niveau des sites de carboxylation, ne répondent que peu ou pas à un enrichissement en CO₂ de l'air (Figure. 58.b). Les plantes C₃ fixatrices d'azote, qui disposent d'une source d'azote permanente pour faire face à une augmentation de l'absorption de CO₂, y répondent plus. Leur réponse est d'autant plus grande que la disponibilité en éléments minéraux est plus grande (Bazzaz, 1990).

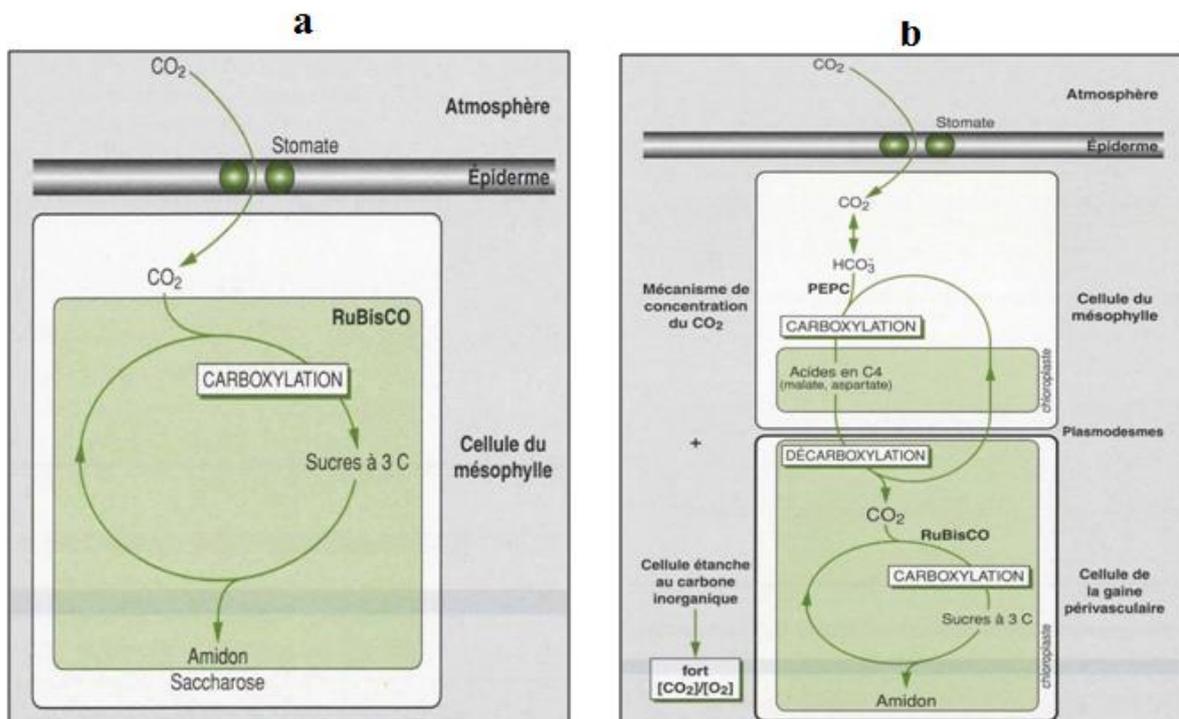


Figure 58. Comparaison de mécanisme cellulaire de la photosynthèse de plantes en C₃ et en C₄

3.3 Sensibilité des rendements de blé dur au changement climatique futur

Les résultats de test de Pearson ont montré que les rendements de cultivar de BD "Mexicali" projetés, sous les quatre scénarios futurs de CC, sont positivement corrélés avec les cumuls saisonniers des précipitations et du rayonnement solaire net incident dans les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA et négativement corrélés avec les températures moyennes de l'air à Sétif. Ces résultats ont confirmé les conclusions d'Ahmad et al. (2019), qui ont montré que le rendement de blé est positivement corrélé aux précipitations saisonnières et au rayonnement solaire net incident et négativement corrélé avec les températures minimales et maximales dans une zone semi-aride du Pakistan. Cependant, Chen et al. (2011) ont rapporté que la tendance au réchauffement de 1961 à 2003 dans la plaine du Nord de la Chine n'a pas eu d'impact significatif

sur le rendement du blé, tandis que la tendance à la baisse du rayonnement solaire a eu un impact négatif sur le rendement du blé beaucoup plus significatif. En outre, Xiong et al. (2012) ont constaté en Chine que la baisse saisonnière du rayonnement solaire pendant la période 1961-2000 a eu un effet négatif plus important sur le rendement du blé plus que l'effet de la tendance au réchauffement observée dans cette période. Autrement, Yu et al. (2013) ont rapporté que le volume des précipitations reçues pendant la phase végétative était le facteur dominant et bénéfique pour le rendement du blé.

3.4 Impact de changement climatique futur sur la durée de cycle de croissance de blé

Une diminution de la D_{CC} de cultivar de BD "Mexicali" a été projetée sous les scénarios S1, S2 et S4 au niveau des deux sites expérimentaux de Sétif et BBA (Tableau. 10). L'augmentation projetée de T_{CC} explique le raccourcissement de la D_{CC} de ce cultivar. Ce résultat est compatible avec les résultats de Bouras et al. (2019) au Maroc, Saadi et al. (2015) pour toute la région méditerranéenne, Zheng et al. (2020) en Chine et à Stöckle et al. (2017) aux États-Unis. Le test de Pearson a également révélé qu'il existe une corrélation positive significative entre la D_{CC} et P_{CC} pendant la PR et sous les quatre scénarios de CC futurs sur les deux sites (Tableau. 11). Par exemple, le prolongement de D_{CC} de cultivar Mexicali de 10 jours dans le scénario S3 à Sétif pourrait s'expliquer par la diminution de T_{CC} de $-0,6^{\circ}C$ et par l'augmentation de P_{CC} de $+65,6$ mm (Tableau. 6). En dépit du raccourcissement de la D_{CC} de blé par l'effet de l'augmentation prévue de la T_{CC} , le rendement de BD pourrait augmenter dans tous les scénarios futurs. Tao et Zhang (2013) et Liu et al. (2013) ont expliqué que le raccourcissement de la D_{CC} est dû au raccourcissement de la durée du stade de développement végétatif, alors que la durée du stade de reproduction est restée intacte, ce qui a empêché les pertes de rendement. Zheng et al. (2020) ont recommandé des cultivars de blé qui fleurissent tôt pour échapper à la culture de blé aux risques de perte des rendements induite par des températures élevées de fin de printemps durant la période de formation de grain.

3.5 Impact de changement climatique futur sur l'évapotranspiration de référence et de la productivité de l'eau de blé

Comme indiqué dans le Tableau. 10, l' ET_0 est prévue de baisser dans tous les scénarios futurs sur les deux sites expérimentaux de -6 à -27% , ce qui peut être partiellement attribué au raccourcissement de la D_{CC} . Ce résultat est conforme à celui d'Acharjee et al. (2017) sur le riz au Bangladesh et de Bouras et al. (2020) sur le BD au Maroc, qui ont rapporté que les besoins potentiels en eau de ces deux cultures diminueraient suite au raccourcissement de leur D_{CC} respectives, et ceci comme une réponse phénologique de la plante à une température plus élevée.

En revanche, Ahmad et al. (2020) ont prédit une augmentation de l' ET_0 saisonnier au Pakistan en raison du réchauffement des températures pendant la saison de croissance du blé, vers la fin du 21^{ème} siècle, sous les deux scénarios RCP 4.5 et du RCP 8.5

Zhang et al. (2007) suggèrent que l'effet combiné de la baisse de la température et de rayonnement net incident durant la saison de déroulement de cycle de blé est également responsable de la diminution de l' ET_0 , cette explication corrobore au cas de scénario S3 dans les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA où des baisses de T_{CC} de - 0.3 et - 0.1°C et une diminution de Rn_{CC} de - 136 et - 42.4 MJ/m² sont projetées respectivement à Sétif et à BBA. Zhang et al. (2013) ont constaté que la diminution de l' ET_0 , durant la période 1960-1992, dans une région humide de la Chine est attribuée à une diminution du rayonnement solaire, tandis que la baisse de la vitesse du vent était le principal facteur de la tendance à la baisse de l' ET_0 dans les régions arides, semi-arides et semi-humide en Chine. Ils ont suggéré que la diminution du rayonnement solaire et/ou de la vitesse du vent compensait l'effet de l'augmentation de la température de l'air sur ET_0 .

Le modèle AquaCrop a prédit une hausse de la WP de cultivar du BD "Mexicali" de + 60 à + 130% à Sétif et de + 43 à + 186% à BBA dans les quatre scénarios futurs de CC (Tableau. 10). Cette amélioration de la WP de l'eau de BD pourrait être due à la baisse des pertes de l'eau de cette culture par évapotranspiration comme le suggèrent Xiao et al. (2018), ces derniers ont prédit une hausse de la WP du blé de printemps et d'hiver en Chine dans les deux horizons 2040 et 2080 sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. De même, Zwart et al. (2010) ont constaté qu'une augmentation de l' ET_0 de 450 à 750 mm pendant la saison de croissance du blé réduisait sa WP de - 46%. Ils ont également détecté une relation positive entre la WP de blé et le volume des précipitations saisonnières accumulées durant le cycle de croissance, ils ont prouvé qu'une augmentation des précipitations de 130 à 300 mm induirait une augmentation de la WP de blé de 0.6 à 1 kg/ha. Cette augmentation prévue de la WP de blé entraînera une augmentation du rendement par unité d'eau perdue par évapotranspiration (Raes 2016).

D'après, Pugh et al. (2016) l'effet fertilisant d'une $[CO_2]$ élevée peut améliorer la WP des plantes C3 (telle que le blé) et stimuler leur activité photosynthétique. Ce résultat est compatible avec les résultats des projections de la WP de cultivar Mexicali sur les deux sites expérimentaux de Sétif et de BBA, car les hausses de la $[CO_2]$ de + 122, + 167, + 180 et de + 394 ppm, par rapport à la $[CO_2]$ ambiante, durant la PR, estimée à 362 ppm, ont provoqué des augmentations de la WP de cultivar Mexicali de (+ 1 et + 0.3), (+1.2 et 0.4), (+ 0.6 et 0.9) et de (+1.3 1 et 1.3) kg/m³ dans les scénarios futurs de CC, S1, S2, S3 et S4, respectivement à Sétif et BBA. Ces résultats indiquent que la WP de ce cultivar de BD, dans les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, est meilleur sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5, à l'exception faite à Sétif pour l'horizon 2035-2064, où

la WP projetée est plus élevée sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5. Cependant, Paymard et al. (2018) ont projeté une diminution de la WP de blé cultivé en pluvial et en irrigué dans le Nord de l'Iran pour l'horizon 2080 sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Ils ont conclu que les semis tardifs au mois de Novembre et une densité de semis de blé appropriée pourraient aider à maximiser la WP de blé.

3.6 Adaptation de blé pluvial au changement climatique futur par le choix d'une date de semis

Les résultats ont montré qu'un semis précoce au mois d'Octobre pourrait aider à adapter la culture de BD au CC futur prédit dans les deux sites étudiés (Figure. 57). Ces résultats confirment ceux obtenus par Brouziyne et al. (2018) au Maroc, qui a constaté que le changement de la date de semis du blé du mois de Novembre à Octobre dans l'horizon futur 2031-2050, sous RCP 4.5 et RCP 8.5, permettait de déplacer le stade de germination vers une période plus pluvieuse (Octobre) et évitera la baisse significative des précipitations attendue au mois de Novembre. Ils ont suggéré que ce changement devrait également échapper le stade de remplissage du grain, de l'augmentation prévue de la température au mois de Mai et Juin, évitant ainsi la sénescence précoce et la baisse du rendement en grains de blé.

Il a été constaté dans les deux sites de Sétif et BBA, que le rendement de BD dépend des changements des précipitations au stade du développement végétatif et de la température au stade de la floraison. Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Yu et al. (2013), sur le blé pluvial en Australie. De même, Nouri et al. (2017) ont démontré que des précipitations abondantes, pendant la phase de développement végétatif, ont facilité un bon établissement du plant de blé et réduit le risque d'échec de plants semés tôt. Cependant, une température élevée pendant la phase de floraison au printemps entraîne une réduction du rendement en grain, en diminuant le nombre de grains produits, en raccourcissant la durée du remplissage des grains et en inhibant l'assimilation du saccharose dans les grains (FAO, 1996). La sélection de cultivars à floraison précoce peut aider la culture de blé à échapper au stress thermique et hydrique pendant la phase de formation du grain (Shavrukov et al. 2017).

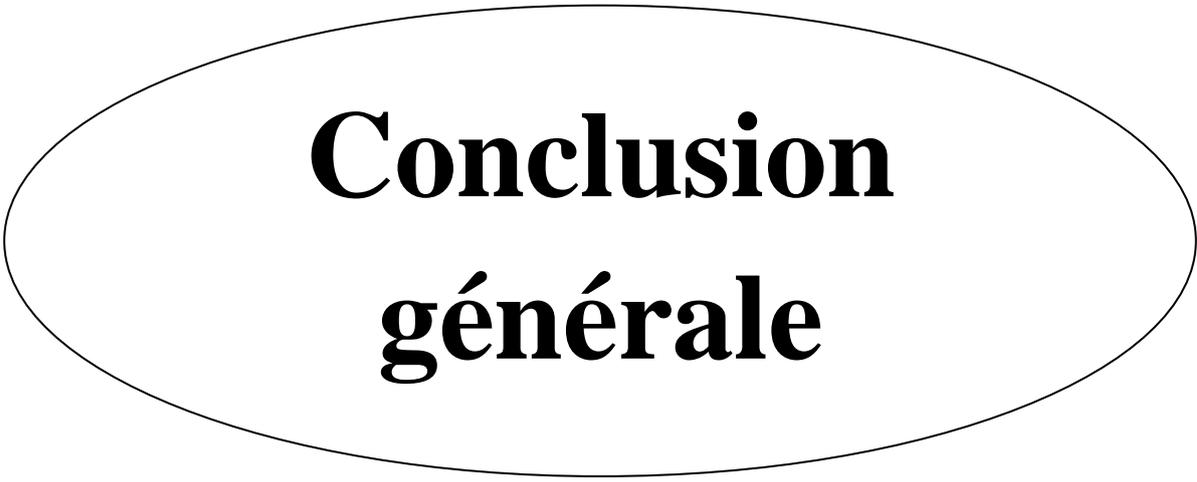
Conclusion

En comparaison aux rendements simulés par le modèle AquaCrop pour la période de référence 1981-2010, estimés à 28.4 et 23.3 q/ha à Sétif et BBA, des gains de rendement de blé dur sont prédits par AquaCrop, qui sont estimés à (+ 82 et + 16), (+ 94.7 et + 7.8), (+ 76.7 et + 133) et (+188 et + 135) % dans les scénarios de changement climatiques futurs RCP 4.5 (2035-2064), RCP 4.5 (2065-2094), RCP 8.5 (2035-2064) et RCP 8.5 (2065-2094), au niveau des deux sites

expérimentaux Sétif et BBA, respectivement. Cette augmentation future des rendements de BD, est prédite en dépit, de l'augmentation de la température moyenne de l'air et de la baisse des précipitations projetées, durant la saison de déroulement de cycle de croissance du BD à Sétif et BBA dans les trois scénarios futurs RCP 4.5 (2035–2064), RCP 4.5 (2065–2094) et RCP 8.5 (2065–2094), et en dépit de la diminution du rayonnement solaire net, dans les quatre scénarios futurs de changement climatique établis dans cette étude..

Cette augmentation prédite de rendement de BD, est due à l'effet fertilisant d'un enrichissement de l'atmosphère en CO₂, projeté dans les deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, sous les deux scénarios RCP. Ce résultat est confirmé par le fait que les rendements projetés sous RCP 8.5, sont plus élevés que sous ceux prévus sous RCP 4.5, à l'exception de l'horizon 2035-2064, où le rendement est meilleur sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5, cela devrait être du à l'effet négatif de la baisse de la température moyenne de l'air, qui a inhibé l'effet fertilisant de la hausse de la concentration en CO₂ sur le rendement de BD projeté. Cependant, sous RCP 4.5 (2035–2064), le rendement du BD sera meilleur à Sétif qu'à BBA, car les stress thermiques et hydrique sévères projetés sous ce dernier scénario, au cours de la saison de déroulement de cycle de croissance de BD à BBA, ont dépassé les seuils, dans lesquels ils ont un effet stimulant de l'effet fertilisant, de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ sur le rendement de BD.

Dans les scénarios de CC futurs étudiés, la concentration élevée de CO₂ projetée induit une augmentation de la production de biomasse en stimulant l'activité photosynthétique et en réduisant les pertes d'eau par évapotranspiration. Ces deux processus devraient améliorer la productivité de l'eau de blé dur sous les conditions climatiques projetées. Aussi, dans les scénarios futurs, la durée du cycle de croissance du blé pourrait être raccourcie en raison de la hausse prédite des températures de l'air et de la baisse des précipitations au cours de la saison de déroulement de cycle de croissance de BD. Pour adapter la récolte de blé pluvial au changement climatique futur dans la Haute Plaine orientale de l'Algérie, il faut éviter les semis tardifs après la mi-Novembre et opter pour des semis précoces au mois d'Octobre, pour bénéficier d'un maximum de précipitations pendant sa phase végétative et pour éviter le stress thermique lors de la phase de floraison en printemps.



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

Cette étude, a essayé de donner un aperçu sur l'évolution du climat dans le futur et son impact sur la production du blé dur cultivé en pluvial, au niveau de deux sites expérimentaux à Sétif et Bordj Bou Arreridj (BBA), situés dans la région semi-aride des Hautes plaines orientales d'Algérie, connue par sa vocation céréalière. L'étude de changement climatique futur, est faite par la comparaison des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des séries, de données observées des précipitations, des températures, du vent, de rayonnement solaire net et de l'humidité relative, durant une période de référence (1981-2010) sur les deux stations météorologiques de Sétif et BBA, par rapport aux moyennes (mensuelles, saisonnières et annuelles) de ces même paramètres climatiques, simulées par le couple modèles GCM/RCM ICHEC_KNMI, durant deux horizons futurs 2035-2064 et 2065-2094, sous deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les moyennes annuelles des pluies observées durant la période de référence (1981-2010), sont estimées à 402,3 et 354,8 mm à Sétif et BBA respectivement. En moyenne, dans la période future (2035-2094), à Sétif, les précipitations pourraient connaître des augmentations de +54,7 et + 31.7% sous RCP 4.5 et RCP 8.5 respectivement. A BBA, une hausse des précipitations estimées à + 31 et + 25% est projetée sous RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement. Les changements projetés dans la distribution mensuelle des précipitations sont à l'origine des changements futurs des moyennes annuelles et saisonnières. Il est toutefois remarqué que les données des précipitations simulées pour les mois d'été, sont surestimées selon le modèle utilisé 'ICHEC-KNMI'.

Les températures moyennes annuelles, observées durant la période de référence (1981-2010), sont estimées à 14.2 et 15.6°C à Sétif et BBA respectivement. Elles sont prévues de connaître une diminution maximale de - 0,6 et - 0.9°C en 2035-2064, sous RCP 4.5 et une augmentation maximale de + 1.2 et + 0.8°C, en 2065-2094, sous RCP 8.5, à Sétif et BBA respectivement.

Des changements des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles de l'humidité de l'air, du vent et du rayonnement solaire net, sont aussi projetés dans les quatre scénarios futurs en combinaison avec les changements des concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, projetées sous les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Le modèle de culture AquaCrop a été validé et calibré selon les données observées d'un cultivar du blé dur appelé "Mexicali", l'évaluation avec les trois indices statistiques RMSE, NRMSE et l'indice de Willmot, de la qualité des simulations des rendements de ce cultivar, faites par ce modèle, a montré la fiabilité de ce modèle à simuler avec une bonne précision les rendements observés durant les trois campagnes d'expérimentation, menées dans un site à Sétif.

Les rendements moyens de ce cultivar du blé dur simulés pour la période de référence (1981-2010) sont estimés à 34.7 et 23.3 qx/ha, en 2035-2064, ils sont projetés d'augmenter de + 82 et + 16 %, sous RCP 4.5, et de + 94.7 et +7.8%, sous RCP 8.5 à Sétif et BBA, respectivement. En 2065-2094, les rendements sont projetés d'augmenter de + 76.7 et + 133.4% sous RCP 4.5 et de + 117.8% et +135% sous RCP 8.5 à Sétif et BBA, respectivement. Ces gains de rendement pourraient être expliqués par l'effet fertilisant de l'enrichissement de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO₂), projeté sous les deux scénarios RCP, ce qui compense les effets négatifs sur les rendements du blé dur, de la baisse des précipitations et de du rayonnement solaire net. Cet effet fertilisant de CO₂ réduit aussi l'effet négatif de la hausse des températures moyennes de l'air, qui raccourcissent la durée de cycle de croissance de blé et induisent une perte de rendement. Ce résultat est validé par l'application du test de Pearson pour l'étude des corrélations entre le changement climatique futur et les rendements futurs du blé dur simulés par Aquacrop.

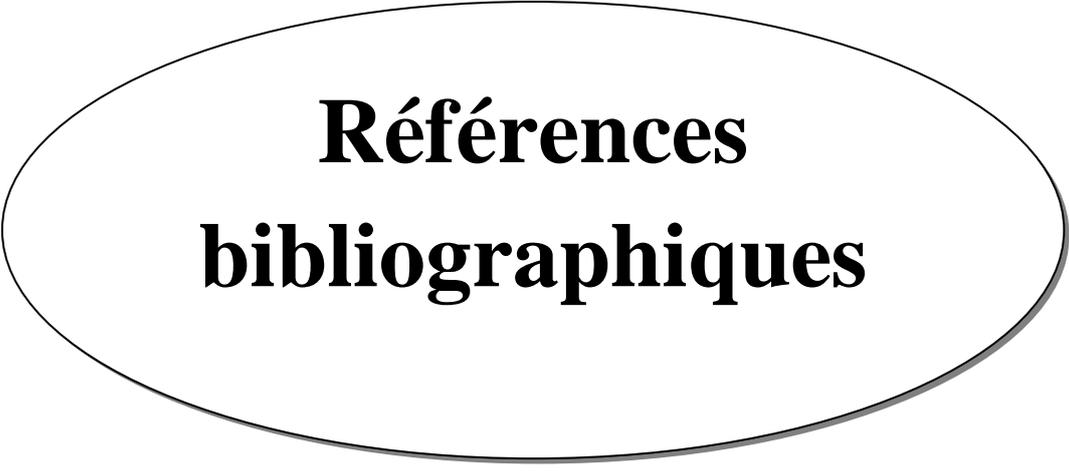
Les moyennes de l'ET₀ pour la période de référence (1981-2010), calculées par la formule de Penman Monteith, pour un semis en fin du mois de Novembre, est estimée à 562.5 et 542.8 mm à Sétif et BBA, respectivement. Elles sont prévues de baisser de -10 à -27% dans les quatre scénarios futurs. Généralement, cette diminution de l'ET₀ dans ces trois scénarios futurs devrait être induite par le raccourcissement de la durée de cycle de croissance de cultivar de blé dur "Mexicali", suite à la hausse des températures prévues dans la majorité des scénarios de changement climatiques futurs étudiés.

Les moyennes de la productivité de l'eau (WP) du cultivar «Mexicali» simulée par le modèle AquaCrop, pour la période de référence 1981-2010, sont estimées à 1 et 0.7 kg/m³, dans les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA, respectivement. Dans l'ensemble, des taux d'amélioration de la WP qui varient de + 43 à + 186 %, sont projetés sous les quatre scénarios futurs, sur ces deux sites étudiés. Cette amélioration de la WP projetée dans le futur, pourrait être due à la diminution prévue des pertes d'eau de la culture du blé par évapotranspiration, induites par l'effet

fertilisant de CO₂ qui stimule l'activité photosynthétique du blé dur et réduit ses pertes d'eau par évapotranspiration, et donc accélère le processus de production de la biomasse.

Pour mieux adapter la culture du blé dur en pluvial, sous le changement climatique futur dans les deux sites expérimentaux de Sétif et BBA, il est recommandé d'abandonner les semis tardifs du mois de Novembre et Décembre, et d'opter pour des semis précoces au mois d'Octobre, cela permet au plant de blé de bénéficier de l'augmentation des précipitations projetée pendant l'automne, ce qui permet une bonne installation de plant du blé et réduit l'échec de semis. Un semis précoce évite également à cette culture, le stress thermique pendant la floraison au printemps, car les températures très élevées de fin du printemps, entraînent des pertes de rendement de blé.

Les résultats de cette étude restent incertains, compte tenu des incertitudes des projections climatiques futures, surtout pour le paramètre précipitation, qui est simulé avec moins de fiabilité par le modèle climatique ICHEC-KNMI. Cette étude devrait être consolidée par d'autres études basées sur des projections climatiques, issues d'un ensemble de modèles climatiques, en association avec d'autres modèles de cultures, et en utilisant divers cultivars locaux de blé, et en tenant compte des apports en fertilisants de sols, et d'irrigation d'appoint et de gestion de la parcelle, afin de mieux mettre en évidence les impacts du changement climatique futur sur la production du blé dur pluvial, dans ses zones potentielles en Algérie. Ces études complémentaires permettront de prévoir des stratégies d'adaptation de cette culture stratégique face au changement climatique futur et la durabilité de son système de production, afin de maintenir la sécurité alimentaire de pays.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- Abed SS et Kerrouche M (2017)** Indices Bioclimatiques: étude du cas de la vague de chaleur en Algérie, dans la perspective de l'élaboration de cartes de vigilance: « Humidex » et « PET », JAMA (1) : 77-84.
- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H and Ahmadd T (2014)** Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* (110): 55–66. doi: 10.1017/S0021859614000094.
- Abid M, Schneider UA and Scheffran J (2016)** Adaptation to climate change and its impacts on food productivity and crop income: Perspectives of farmers in rural Pakistan. *J. Rural Stud.*, 47, 254–266.
- Acevedo E, Silva P and Silva H (2009)** Wheat Growth and Physiology, FAO. Corporate Repository, pp. 1-24.
- Acharjee TK, Ludwig F, van Halsema G, Hellegers Pand Iwan S (2017)** Future changes in water requirements of Boro rice in the face of climate change in North-West Bangladesh. *Agr Water Manage* 194:172-183. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.008>
- Addor N, Rohrer M, Furrer R and Seibert J (2016)** Propagation of biases in climate models from the synoptic to the regional scale: Implications for bias adjustment. *J Geophys Res-Atmos* 121:2075–2089. <https://doi.org/10.1002/2015JD024040>
- Adeboye OB, Schultz B, Adeboye AP, Adekalu KO and Osunbitan JA (2020)** Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*. doi:10.1016/j.inpa.2020.10.002
- Admassu H, Getinet M, Timothy ST, Waithaka M and Kyotalimye M (2012)** East African Agriculture and Climate Change: a comprehensive analysis –Ethiopia. Project note. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Addis Ababa, Ethiopia Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, pp. 47-70
- Ahmad MJ, Cho GH, Kim SH, Lee S, Adelodun B and Choi KS (2020)** Influence mechanism of climate change over crop growth and water demands for wheat-rice system of Punjab, Pakistan. *J Water Clim Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.009>

- Ahmad MJ, Choi KS, Cho GH and Kim SH (2019)** Future wheat yield variability and water footprints based on the yield sensitivity to past climate conditions. *Agron J* 9(11):744. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110744>
- Al-Bakri J, Suleiman A, Abdulla F and Ayad J. (2011)** Potential impact of climate change on rainfed agriculture of a semi-arid basin in Jordan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(5-6), 125–134. doi:10.1016/j.pce.2010.06.001
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Kumar KR, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M and Vazquez-Aguirre JL (2006)** Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 111, D05109
- Al-Issawi M, Rihan HZ, El-Sarkassy N and Fuller MP (2012)** Frost Hardiness Expression and Characterisation in Wheat at Ear Emergence. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(1), 66–74. doi:10.1111/j.1439-037x.2012.00524.x
- Allam A, Moussa R, Najem W and Bocquillon C (2020)** Specific climate classification for Mediterranean hydrology and future evolution under Med-CORDEX regional climate model scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(9):4503-4521. DOI: 10.5194/hess-24-4503-2020.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M. (1998)** Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop requirements. FAO irrigation and drainage paper, vol. 56, Rome, 15 p.
- Alshikh MAA, Ibrahim MH, Salih SAR, Kadhim AH and Almageed MKA (2017)** Adaptation of Sowing Date for Improving Sorghum Yield in Rainfed Areas in Sudan Using AQUACROP Model. *Journal of Agricultural Science*, 9(8), 220. doi:10.5539/jas.v9n8p220
- Alvarez I and Lorenzo M N (2018)** Changes in offshore wind power potential over the Mediterranean Sea using CORDEX projections. *Reg Environ Change* (19) : 79–88. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1379-6>
- Ambrósio E, Couto-Santos FR and Cunha DA (2017)** COP21: outcomes and framework analysis. *Revesta Espacios*. Vol 38 (7). 19 p
- Amiri E (2016)** Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management, *communications in soil science and plant analysis* (47) 3: 387-403. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719>

- Ammar (2014)** Organisation de la chaîne logistique dans la filière céréales en Algérie. Etat des lieux et perspectives. Thèse de master. Institut Agronomique méditerranéen de Montpellier. 114 p
- ANDI (2013 a)** Agence Nationale de Développement et d'Investissement. Présentation de la wilaya de Sétif. 21 p
- ANDI (2013 b)** Agence Nationale de Développement et d'Investissement. Présentation de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. 17 p
- Andreadis KM, Clark EA, Wood AW, Hamlet AF and Lettenmaier DP (2005)** Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 6 (6): 985-1001
- Anonyme (1992)** Climatic Factors and their Effect on Crop Production. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology* (26): 39–83. doi:10.1016/b978-0-444-88912-6.50006-2
- Anser MK, Hina T, Hameed S, Nasir MH, Ahmad I and Naseer AR (2020)** Modeling Adaptation Strategies against Climate Change Impacts in Integrated Rice-Wheat Agricultural Production System of Pakistan. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 2522; doi:10.3390/ijerph17072522
- Antle JM (1983)**. Sequential Decision Making in Production Models. *American Journal of Agricultural Economics*, 65(2), 282. doi:10.2307/1240874
- Arbadi R, Bacciu V, Benkheira A, Bouazzaoui A, Bouzid BW, Brachemi O, Ziani CSM, Ghouari N, Salis M and Tefiani W (2018)** Réduction d'échelle et modélisation climatique avec une application à la gestion des forêts en Algérie. *Climat South*, Technical Paper 4. 56 p
- Arnell NW, Livermore MJL, Kovats S, Levy PE, Nicholls R, Parry ML and Gaffin SR (2004)** Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines. *Glob Environ Change* 14: 3–20
- Arunrat N, Wang C, Pumijumnong N, Sereenonchai S and Cai W (2020)** Farmers' intention and decision to adapt to climate change: A case study in the Yom and Nan basins, Phichit province of Thailand. *J. Clean. Prod.* 2017, 143, 672–685. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 2
- Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC et al. (2013)**. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 827–832. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1916>

- Asseng S, Foster I and Turner NC (2011)** The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17(2), 997–1012. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x
- Asseng S, Turner NC, Ray J.D and Keating BA (2002)** A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. *European Journal of Agronomy* 17 : 123-141
- Attri SD and Rathore LS (2003)** Simulation of impact of projected climate change on wheat in India. *Int J Climatol*23(6):693–705. <https://doi.org/10.1002/joc.896>
- Augustine JA et Dutton EG (2013)** Variability of the surface radiation budget over the United States from 1996 through 2011 from highquality measurements, *J. Geophys.Res. Atmos.*, 118, 43–53, doi:10.1029/2012JD018551
- Ayar PV, Vrac M, Bastin S, Carreau J, Déqué M and Gallardo C (2015)** Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models under the EURO- and MED-CORDEX initiative framework: present climate evaluations. *Clim. Dyn.* 46 (3): 1301–1329.
- Bachir (2011)** Analyse et cartographie des paramètres climatiques (précipitations, températures) et incidences sur la délimitation des céréales pluviales des Hauts Plateaux de l'Est algérien. Thèse de Magister, ENSA El Harrach. 100 p.
- Baiamonte G, Minacapilli M and Crescimanno G (2020)** Effects of Biochar on Irrigation Management and Water Use Efficiency for Three Different Crops in a Desert Sandy Soil. *Sustainability* (12) 7678, doi:10.3390/su12187678
- Baldwin JW, Dessy JB, Vecchi GA and Oppenheimer M. (2019)** Temporally Compound Heat Wave Events and Global Warming: An Emerging Hazard. *Earth's Future*. doi:10.1029/2018ef000989
- Bandi M (2003)** Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. Modelos para cultivos. <http://www.ciomta.com.ar/downloads/modelocultivo.pdf>.
- Bannayan M, Lotfabadi S, Sanjani S, Mohammadian A and Aghalikhani M (2011)** Effects of precipitation and temperature on cereal yield variability in northeast of Iran. *Int J Biometeorol* 55:387–40. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0348-7>
- Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo R and Garcia-Herrera R. (2011)** The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science*,
- Basso B and Ritchie JT (2015)** Simulating crop growth and biogeochemical fluxes in response to land management using the SALUS model. Pages 252-274 in S. K. Hamilton, J. E. Doll, and G. P. Robertson, editors. *The Ecology of Agricultural*

- Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. Oxford University Press, New York, New York, USA
- Battisti DS and Naylor RL (2009)** Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat. *Science*, 323(5911), 240–244. doi:10.1126/science.1164363
- Bazzaz FA (1990)** The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. *Ann Rev Ecol Syst* 1990 ; 21 : 167-96
- Beauval (2017)** Hauts plateaux algériens : supériorité des variétés paysannes de céréales. *Revue électronique InfOGM*. <https://www.infogm.org/6281-algerie-superiorite-varietes-paysannes-cereales>.
- Beheydt D, Boeckx P, Sleutel S, Li C, Cleemput OV (2007)** Validation of DNDC for 22 long-term N₂O field emission measurements. *Atmospheric Environment* (41): 6196–6211. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.04.003.
- Bennett J, Grose M, Post D, Ling F, Corney S et Bindoff N (2011)** Performance of quantile-quantile bias-correction for use in hydroclimatological projections. Conference: MODSIM2011 International Congress on Modelling and Simulation, Perth.
- Bensemmane L, Bouzerzour H, Benmahammed A, Mimouni H (2011)** Assessment of the phenotypic variation within two- and six rowed barley (*Hordeum vulgare* L.) breeding lines under semiarid condition. *Adv Environ Biol* 5:1454–1460
- Berger S, Sinha AK, Roitsch T (2007)** Plant physiology meets phytopathology: plant primary metabolism and plant–pathogen interactions. *J. Exp. Bot.* 58, 4019–4026.
- Berry PM, Rounsevell MDA, Harrison PA, Audsley E (2006)** Assessing the vulnerability of agricultural land use and species to climate change and the role of policy in facilitating adaptation. *Environ. Sci. Policy* 9, 189–204
- Bert FE, Laciana CE, Podestá GP, Satorre EH et Menéndez AN (2007)** Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agricultural Systems*, 94(2), 141–150. doi:10.1016/j.agry.2006.08.003
- Bessaoud O, Pellissier JP, Rolland JP, Khechimi W (2019)** Rapport de synthèse sur l’agriculture en Algérie. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM., pp.82. hal-02137632
- Bichet A, Wild M, Folini D et Schär C (2012)** Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. *Geophys. Res. Lett.* 39, L11701
- Black K, Davis P, Lynch P, Jones M, McGettigan M and Osborne B (2006)** Long-term trends in solar irradiance in Ireland and their potential effects on gross primary

- productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4), 118–132. doi:10.1016/j.agrformet.2006.09.005
- Boote KJ, Jones JW and Singh P (1992)** Modeling growth and yield of groundnut. Pages 331-343 *Groundnut a global perspective: proceedings of an international workshop*. 25-29 Nov 1991. ICRISAT Center. India (Nigam. S.N ed.), Patancheru.A.P. 502 324. India:International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropic
- Boufenar F et Zeghouane O (2006)** Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine). ITGC. 154 p
- Boukerrou F et Djaalab S (2013)** Crise structurelle du système de production agricole et crise de la dépendance alimentaire comme phénomène durable en Algérie. *مجلة العلوم* استرجاعيفمين 133-158 ,(39) الإنسانية, <http://revue.umc.edu.dz/index.php/h/article/view/145>
- Bouras E, Jarlan L, Khabba S, Er-Raki S, Dezetter A, Sghir F, Trambly Y (2019)** Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Sci Rep-UK*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
- Bourihane B et Mekkaoui K (2013)** Analyse des déterminants de la production du blé en Algérie Cas des wilayas Tiaret, Sétif et Médéa L'échantillon 1990 – 2009.Thèse de master. Université Abderrahmane Mira de Bejaia
- Bouzerzour H, Oudina M (1989)** Association de certains caractères morphologiques au rendement grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en conditions semi-arides. *Ann Inst Nat Agron El Harrach* 13(1):157–167
- Bowes G (1991)** Growth at elevated CO₂: photosynthetic responses mediated through Rubisco. *Plant, Cell and Environment*, 14(8), 795–806. doi:10.1111/j.1365-3040.1991.tb01443.x
- Brandimarte L, Di Baldassarre G, Bruni G, D'Odorico P et Montanari A (2011)** Relation between the north-atlantic oscillation and hydroclimatic conditions in mediterranean areas, *Water Resour Manage* (25): 1269–1279.
- Brisson N, Gary C, Justes E, Roche R, Mary B, Ripoche D et al. (2003)** An overview of the crop model.European Journal of Agronomy 18.
- Brisson N, Wery J et Boote K. (2006)** Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J.W. (Eds.), *Working with dynamic crop models*. Elsevier, Amsterdam, pp 257-280

- Broecker WS (1997)** Thermohaline Circulation, the Achilles Heel of Our Climate System: Will Man-Made CO₂ Upset the Current Balance? *Science*, 278 (5343): 1582–1588. doi:10.1126/science.278.5343.1582
- Brouziyne Y, Abouabdillah A, Hirich A, Bouabid R, Zaaboul R et Benaabidate L. (2018)** Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*, 162, 154e163. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.024>.
- Cadi A (2005)** Caractérisation des zones céréalières potentielles à travers le Nord de l'Algérie. *Rév. ITGC. Céréaliculture n° 44* : 36-39
- Cadi A, Dellig A, Sarfatti P, Chiar T, Bellah F et Bazzani F (2000)** SIG et zonage agro-écologique : Application au Nord algérien. *Rév. Céréaliculture n° 34 ITGC* : 68-75.
- Cadi A. (2005)** Caractérisation des zones céréalières potentielles à travers le Nord de
- Cammarano D, Payero J, Basso B, Stefanova L and Grace P (2012)** Adapting wheat sowing dates to projected climate change in the Australian subtropics: analysis of crop water use and yield. *Crop Pasture Sci* 63:974–986. <https://doi.org/10.1071/CP11324>
- Cane MA (2004)** The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters* (230) 3 – 4: 227-240. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.003>
- Casanueva A, Kotlarski S, Herrera S, Fischer AM, Kjellstrom T and Schwierz C. (2019).** Climate projections of a multivariate heat stress index: the role of downscaling and bias correction. *Geoscientific Model Development*, 12(8), 3419–3438. doi:10.5194/gmd-12-3419-2019
- Castro CL, Roger A, Pielke Sr and Leoncini G. (2005)** Dynamical downscaling: assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). *Journal of Geophysical Research* 110: D05108. doi:10.1029/2004JD004721
- Cattiaux J, Yiou P and Vautard R (2012)** Dynamics of future seasonal temperature trends and extremes in Europe: a multi-model analysis from CMIP3.(Report). *Clim. Dyn.*, 38, 1949.
- Cavazos T, Turrent C and Lettenmaier DP (2008)** Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35, L21703.
- Célestin, M., Emmanuel, LA, Batablinè L and Marc N (2019)** Spatio-Temporal Analysis of Climate Change Impact on Future Wind Power Potential in Burundi (East Africa).

- American Journal of Climate Change, 8: 237-262.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2019.82014>
- Celik SK, Madenoglu S, Sonmez B (2018)** Evaluating AquaCrop model for winter wheat under various irrigation conditions in Turkey. *J Agr Sci* 24: 205–217. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.446438>.
- CGIAR (2020)** CGIAR Research Program on Wheat <https://www.cgiar.org/research/program-platform/wheat>
- Chadouli A et Djane-Hamed M (2015)** Irrigation d'appoint du blé. Brochure, ITGC, 16 p.
- Challinor AJ, Smith MS and Thornton P (2013)** Use of agro-climate ensembles for quantifying uncertainty and informing adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 2–7. doi:10.1016/j.agrformet.2012.09.007
- Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Slingo JM and Grimes DIF (2004)** Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agr Forest Meteorol* 124:99–120.
- Chambenoit C (1999)** Evaluation en Poitou – Charentes d'un modèle de fonctionnement d'une culture de blé tendre, Azodyn. Mémoire de fin d'études. ENITA Clermont – Ferrand, 36 p
- Chameides WL, Yu H, Liu SC, Bergin M, Zhou X, Mearns L, Steiner A and Giorgi F (1999)** Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(24), 13626–13633. doi:10.1073/pnas.96.24.13626
- Chapman S, Cooper M and Hammer GL (2002)** Using crop simulation to generate genotype by environment interaction effects for sorghum in water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 53 : 379 - 389.
- Chapman SM, Cooper M, Podlich D and Hammer GL (2003)** Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal* 95 : 99-113.
- Charles A, Kalikoski D and Macnaughton A (2019)** Addressing the climate change and poverty nexus. A coordinated approach in the context of the 2030 Agenda and the Paris Agreement. Rome. Italy
- Charron I (2016)** Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition Ouranos, 94 p.

- Che H, Shi G, Zhang X, Zhao J and Li Y (2007)** Analysis of sky conditions using 40 year records of solar radiation data in China. *Theor. Appl. Climatol.* 89, 83–94
- Chen J, Brissette FP and Leconte R (2011)** Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *J Hydrol* 401(3–4):190–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>
- Chikowo R, Corbeels M, Tittonell P, Vanlauwe B, Whitbread A and Giller KE (2008)** Aggregating field-scale knowledge into farm-scale models of African smallholder systems: summary functions to simulate crop production using APSIM. *Agric. Syst.* 97,151–166
- Choudhary D (2018)** Crop growth simulation mode. Book, ANAND Agricultural University, p 22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35505.28008>
- Choudhury B (2001)** Modeling radiation-and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. *Agric. For. Meteorol.* 106, 317–330
- Chourghal N (2016)** Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie. Thèse de doctorat à l'ENSA El Harrach. 209 pages
- Chourghal N, Lhomme JP, Huard F et Aidaoui A (2015)** Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional Environmental Change*, 16(6), 1623–1634. doi:10.1007/s10113-015-0889-8
- Chowdhury S, Al-Zahrani M and Abbas A. (2016)** Implications of climate change on crop water requirements in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* (28) 1: 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.11.001>
- Christensen JH and Christensen OB (2003)** Climate modeling: Severe summertime flooding in Europe, *Nature*, 421, 805–806.
- Chung ES, Park K and Lee KS (2011)** The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed. *Hydrological Processes*, 25(4), 544–560. doi:10.1002/hyp.7781
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V et al (2005)** Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529–533. doi:10.1038/nature03972
- CIC (Conseil International des Céréales) (2020).** Rapport sur l'exercice 2019/20, Londres : CIC/IGC, http://igc.int/en/gmr_summary.aspx#.
- Clement G and Prats J (1970)** Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2^{ème} Ed. 351p *Climate*, 21(9), 1850-1862.

- Cline R (2008)** Global Warming and Agriculture. Finance & Development, Mars 2008.
- Cline W (2007)** Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country. Washington, DC: Peterson Institute for International Economics.
- Collins MKnutti R, Arblaster J, Dufresne JL, Fichefet T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski WJ, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver AJ and Wehner M (2013)** Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Craufurd PQ and Wheeler TR (2009)** Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2529-253
- Cunniffe NJ, Koskella B, Metcalf JE, Parnell S, Gottwald TR and Gilligan CA (2015)** Thirteen challenges in modelling plant diseases. *Epidemics* 10, 6–10.
- Curry RB, Peart RM and Jones JW (1990)** Response of crop yield to predicted changes in climate and atmospheric CO₂ using simulation. *Trans. ASAE.*, 33, 1383-1390.
- Curtis BC (2002)** Wheat in the world. In: Curtis BC, Rajaram S, Gómez Macpherson H. (Eds.), *Bread Wheat*. Publishing and Multimedia Service, Information Division, FAO, Rome, Italy p 554
- Dai AG, Trenberth KE et Qian TT (2004)** A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130
- Dai A (2010)** Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45–65. doi:10.1002/wcc.81
- De Wit CT (1965)** Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Report No. 663 PUDOC, Wageningen, The Netherlands
- De Wit CT (1967)** Photosynthesis: its relationship to overpopulation. p. 315-320. In *Harvesting the sun*. Academic Press, New York.
- De Wit CT, Brouwer R et Penning de Vries FWT (1970)** The simulation of photosynthesis systems. In: *Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity*. Centre for
- De Wit CT, Goudriaan J (1978)** Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation monograph. PUDOC, Wageningen, The Netherlands

- Demissie SS et Cunnane C (2002)** Representation of climate change in flood frequency estimation, in: Celtic water in European framework—pointing the way to quality. In: Proceedings of the 3rd inter-Celtic colloquium on hydrology and management of water resources. National University of Ireland, Galway..
- Déqué M (2007)** Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1-2), 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Deryng D (2015)** Climate change impacts on crop productivity in global semi-arid areas and selected semi-arid economies. Small Grants Programme. Working Paper.
- Deryng D, Elliott J, Folberth C, Müller C, Pugh TAM, Boote KJ et al. (2016)** Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change*, 6(8), 786–790. doi:10.1038/nclimate2995
- Diepen CA, Wolf J, Keulen H and Rappoldt C (1989)** WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16–24. doi:10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.xDivision, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Djebali K (2015)** Contribution à l'étude de l'aléa " inondations": Genèse et prédiction Cas de la vallée d'El-Abadia (w.Ain Defla). Mémoire de Master. Ecole nationale supérieure d'hydraulique -Arbaoui Abdellah. 85 p
- Djermoun A (2009)** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie* (1) : 45 -53.
- Dobor L, Barcza Z, Hlasny T, Havasi A, Horvath F, Ittzes P et Bartholy J (2015)** Bridging the gap between climate models and impact studies: The FORESEE Database, *Geoscience Data Journal* (2): 1–11. Publié par Royal Meteorological Society and John Wiley & Sons Ltd. DOI: 10.1201/9781315272610. Publisher: CRC PressISBN: 9781315272610
- Donatelli M, Magarey RD, Bregaglio S, Willocquet L, Whish JPM et Savary S (2017).** Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, 155, 213–224. doi:10.1016/j.agsy.2017.01.019
- Dore MHI (2005)** Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International* (31) : 1167 – 1181
- Dourado-Neto D, Teruel DA, Reichardt K, Nielsen DR, Frizzone JA et Bacchi OOS (1998)** Principles of crop modelling and simulation: II: the implications of the objective

- in model development. *Scientia Agricola*, 55(spe), 51–57. doi:10.1590/s0103-90161998000500009
- DUN and CPS (2018)** Ducks Unlimited Canada et Conservation Production System. In winter wheat production manual. Chapter 10. Growth Stages of Wheat. PP: 1001-1012. Saskatchewan. Canada.
- Dzotsi KA, Basso B and Jones JW (2013)** Development, uncertainty and sensitivity analysis of the simple SALUS crop model in DSSAT. *Ecol. Model.* 260, 62–76.
- Eddy JA (1976)** The Maunder Minimum. *Science*, 192(4245), 1189–1202. doi:10.1126/science.192.4245.1189
- El Watan (2015)** On peut vivre la canicule à n'importe quelle période de l'année. Interview avec le chercheur algérien en sciences de l'atmosphère Mahi Tabet-Aoul au quotidien El Watan de 15 aout 2015.
- El Watan (2018)** Céréales : L'Algérie a produit plus de 60 millions de quintaux. Article rubrique Economie. Quotidien El Watan de 1 septembre 2018.
- El-Beltagy A et Madkour M (2012)**. Impact of climate change on arid lands agriculture. *Agriculture & Food Security*, 1(1), 3. doi:10.1186/2048-7010-1-3
- El-Samra R, Bou-Zeid E, Bangalath H. K, Stenchikov G and El-Fadel M (2018)** Seasonal and regional patterns of future temperature extremes: High-resolution dynamic downscaling over a complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 6669–6689. <https://doi.org/10.1029/2017JD027500>
- Erbs M, Manderscheid R, Jansen G, Seddig S, Pacholski A and Weigel HJ (2010)** Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation. *Agr Ecosyst Environ* 136 (1–2):59–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.009>
- Esker PD, Savary S and McRoberts N (2012)** Crop loss analysis and global food supply: focusing now on required harvests. *CAB Reviews: perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 052. *CAB Reviews* 2012, pp. 1–14
- Evans LT, Wardlaw IF and Fischer RA (1975)** Wheat. In L.T. Evans, ed. *Crop physiology*, p. 101-149. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Faci (2018)** Evolution du nombre et de la durée de l'apparition des canicules en Algérie. CRSTRA.sciencesconf.org/aic2018:196216.
- FAO (1987)** Nutrition humaine en Afrique tropicale. Manuel pour le personnel de santé. 306 p, Rome.

- FAO (1996)** Global climate change and agricultural production. In Chapter 6: Abrol YP and Ingram K .Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. Chapter 6: Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants. FAO. Rome. Italy
- FAO (2003)** Agricultural commodities: profiles and relevant WTO negotiating issues. Information division. Rome. 89 p
- FAO (2015)** Organisation Mondiale des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. The Impact of Natural Hazards and Disasters on Agriculture and Food and Nutrition Security – A Call for Action to Build Resilient Livelihoods. FAOSTAT
- FAO (2016)** Introducing AquaCrop. i6321e.documentI6321En/1/10.16
- FAO (2018)** The state of agricultural commodity markets 2018. Agricultural trade, climate change and food security, Rome, Italy
- FAO andt OECD (2018)** Food security and nutrition: challenges for agriculture and the hidden potential of soil. A report to the G20 agriculture deputies prepared by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the Organization of Economic Co-Operation and Development (OECD). p 33
- FAOSTAT (2021)** http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity
- Fasullo JT (2010)** Robust land-ocean contrasts in energy and water cycle feedbacks. *J. Clim* (23): 4677–4693
- Faulk RO and Gray JS (2007)** Stormy Weather Ahead? The Legal Environment of Global Climate Change".Livre 122 pages. Express O
- Feldman M and Kislev ME (2007)** Domestication of emmer wheat and evolution of free-threshing tetraploid wheat. *Israel J. Plant Sci.* 55: 207 – 221
- Feliachi K (2000)** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. Dans : Actes du premier symposium international sur la filiÈre blÈ 2000 - Enjeux et stratégies, Alger (Algérie), 7-9 février 2000, pp. 21-27
- Ferris R, Ellis RH, Wheeler T R and Hadley P (1998)** Effect of High Temperature Stress at Anthesis on Grain Yield and Biomass of Field-grown Crops of Wheat. *Annals of Botany* (82): 631-639, Article No. bo980740
- Fitzgerald GJ, Tausz M, O'Leary G, Mollah MR, Tausz-Posch S, Seneweera et al. (2016)** Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Global Change Biology*, 22(6), 2269–2284. doi:10.1111/gcb.13263

- Flato G, Marotzke J, Abiodun B, Braconnot P, Chou SC, Collins W et al. (2013)** Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Fontaine B, Roucou P, Gaetani M. and Marteau R (2011)** Recent changes in precipitation, ITCZ convection and northern tropical circulation over North Africa (1979–2007). *International Journal of Climatology*, 31(5), 633-648
- Foughali A, Trambly Y, Bargaoui Z, Carreau J and Ruellan D (2015)** Hydrological Modeling in Northern Tunisia with Regional Climate Model Outputs: Performance Evaluation and Bias-Correction in Present Climate Conditions. *Climate*, 3(3), 459–473. doi:10.3390/cli3030459
- Fowler HJ, Blenkinsop, S and Tebaldi C (2007)** Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578. doi:10.1002/joc.1556
- Freidenreich SM and Ramaswamy V (2011)** Analysis of the biases in the downward shortwave surface flux in the GFDL CM2.1 general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 116(D8).doi:10.1029/2010jd014930.
- Friis-Christensen E and Lassen K (1991)** Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate, *Science* 254, 698–700.
- Gago-Silva A, Gunderson I, Goyette S and Lehmann A (2012)** Delta-method applied to the temperature and precipitation time series - An example. Technical document.enviroGRIDS_D3.6 C3i, University of Geneva, 40 pages. DOI: 10.13140/RG.2.1.3301.2882
- Gallagher JN and Biscoe PV (1978)** A physiological analysis of cereal yield. II. Partitioning of dry matter. *Agric. Prog.*, 53: 51-70.
- Gálvez G (2008)** Modelación del crecimiento de las plantas. Modelación de cultivos agrícolas. En: Seminario de modelación de cultivos. 13-14 Mars.
- Gao Y, Gao X et Zhang X (2017)** The 2 °C Global Temperature Target and the Evolution of the Long-Term Goal of Addressing Climate Change—From the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement. *Engineering*, 3(2), 272–278. doi:10.1016/j.eng.2017.01.022

- García-Mozo H, Mestre A and Galán C (2010).** Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 575–580. doi:10.1016/j.agrformet.2010.01.023
- Gate P (1995)** Ecophysiologie du blé de la plante à la culture. Paris, Lavoisier Tec&Doc – ITCF
- Gharbia SS, Gill L, Johnston P et al. (2016)** Multi-GCM ensembles performance for climate projection on a GIS platform. *Model. Earth Syst. Environ* (2) 102. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0154-2>
- Gharibdousti SR, Kharel G, Miller RB, Linde E and Stoecker A (2019)** Projected climate could increase water yield and cotton yield but decrease winter wheat and sorghum yield in an agricultural watershed in Oklahoma. *Water-Sui* 11(1), 105:1–12. <https://doi.org/10.3390/w11010105>.
- Ghulami M. (2017)** Assessment of climate change impacts on water resources and agriculture in data scarce Kabul basin, Afghanistan. Other. Université Côte d’Azur; Asian institute of technology, ffnNT: 2017AZUR4135ff. fftel-01737052f
- GIE (2007 b)** Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (sous la direction de Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Linden, P.J. van der et Hanson, C.E. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 976 p.
- GIEC (2000)** Summary for policymakers emissions scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. Nakic’enovíc N’, Davidson O, Davis G, Grübler A, Kram T, La Rovere L, Metz B, Morita T, Pepper W, Pitcher h, Sankovski A, Shukla P, Swart R, Watson R et Dadi Z
- GIEC (2001)** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the
- GIEC (2007 a)** Changement climatique 2007: les bases de la science physique. Contribution du Groupe de travail I au quatrième évaluation Rapport du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 996 pages.
- GIEC (2010)** Understanding climate change 22 years of IPCC assessment. Brochure. 9pages. https://archive.ipcc.ch/pdf/press/ipcc_leaflets_2010/ipccbrochure_understanding.pdf

- GIEC (2011)** Les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC : quelques clés pour comprendre. Synthèse du séminaire Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) du 23 novembre, Paris, page 10.
- GIEC (2012)** Intergovernmental Panel on Climate Change. in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (eds Field, C. B. et al.) 1–19 (Cambridge Univ. Press, 2012)
- GIEC (2013)** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
- GIEC (2014)** *Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse Résumé à l'intention des décideurs*. 33 pages.
- GIEC (2018)** *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press
- GIEC (2019)** *Résumé à l'intention des décideurs, Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* [sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer], sous presse.
- Giller KE (2013)** Effects of climate variability and climate change on crop production in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 49, 115–125. doi:10.1016/j.eja.2013.04.004
- Gillett NP, Fyfe JC and Parker DE (2013)** Attribution of observed sea level pressure trends to greenhouse gas, aerosol, and ozone changes. *Geophys. Res. Lett*, 40, 2302–2306.
- GISS (2014)** NASA Finds 2013 Sustained Long-Term Climate Warming Trend. [online] Available at: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20140121//> (Accessed September
- Goudriaan J (1977)** *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*, Thèse, Department Theoretical Production Ecology. Agricultural University, Pudoc, Wageningen pub, Netherlands, pub, 249 p

- Gourdji SM, Sibley AM and Lobell DB (2013)** Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024041. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024041
- Grandcourt C and Prat (1970)** Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed. PP351-360
- Gray CD and Kinnear PR (2012)** IBM SPSS Statistics 19 made simple. Book, p 688. Psychology press. New York
- Greaves G and Wang YM (2016)** Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. *Water*, 8(12), 557. doi:10.3390/w8120557
- Groisman PY and Knight RW (2008)** Prolonged dry episodes over the conterminous United States: New tendencies emerging during the last 40 years. *Journal of groundnut. Agrometeorology of Groundnut: Proceedings of an International Symposium, Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*
- Guillaume S (2011)** Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. These de doctorat de l'Université de Toulouse. 199 pages
- Hadour A, Mahé G et Meddi M (2020)** Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100671. doi:10.1016/j.ejrh.2020.100671
- Hales (2019)** Algeria Grain and Feed Annual. Grain report n° AG1904, USDA, 15 p.
- Hammad HM, Abbas F, Ahmad A, Farhad W, Anothai J and Hoogenboom G (2017)** Predicting water and nitrogen requirements for maize under semi-arid conditions using the CSM-CERES-Maize model. *European Journal of Agronomy*. doi:10.1016/j.eja.2017.10.008
- Hammer GL, Goynes PJ and Woodruff DR (1982)** Phenology of Sunflower Cultivars. III. Models for prediction in Field Environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 33 : 251-261.
- Hannah L (2015)** Climate Change Biology. Book, Elsevier edition, 470 pages, <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12835-8>.
- Hansen J, Nazarenko L, Ruedy R, Sato M, Willis J, Del Genio A, Koch D, Lacis A, Lo K, Menon S, Novakov T, Perlwitz J, Russell G, Schmidt GA et Tausnev N (2005)** Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science*, 308(5727), 1431–1435.

- Hansen J, Ruedy R, Sato M and Lo K. (2010)** Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48: 1–29.
- Hansen J, Sato M, Kharecha P and Von Schuckmann K (2011)** Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 13421–13449.
- Harvey D (2000)** Climatic change and variability - past, present and future. In Slaymaker O. and Spencer T., eds. *Climate and global environmental change*. Essex, United Kingdom: Pearson Education, 3–8.
- Hatfield JL et Prueger JH (2015)**. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. doi:10.1016/j.wace.2015.08.001
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM and Wolfe DW (2011)**. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103: 351-370.
- Hayhoe K, Stoner A and Gelca R (2013)** Climate change projections and indicators for Delaware. *ATMOS Research and Consulting*. 56 p.
- Haylock MR et Goodess CM (2004)** Interannual variability of European extreme winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *International Journal of Climatology*, 24(6), 759-776
- Hébert J (1975)** Données récentes sur la fertilisation du blé in *Techniques nouvelles de production du blé*, I.T.C.F., 142-1
- Hernandez-Ochoa IM, Asseng S, Kassie BT, Xiong W, Robertson R, Luz Pequeno DN et al (2018)** Climate change impact on Mexico wheat production. *Agr Forest Meteorol* 263:373–387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Hertig E, Maraun D, Bartholy J, Pongracz R, Vrac M, Mares I, Gutiérrez JM, Wibig J and Casanuev A. (2017)** Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfectpredictor experiment of the COST Action VALUE. *Int. J. Climatol* : 1–22. DOI: 10.1002/joc.5469.
- Hochman ZVI (1982)** Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field Crops Res.*, 5: 55-67.95.
- Högy P, Wieser H, Köhler P, Schwadorf K, Breuer J, Franzaring J et al. (2009)**. Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO₂enrichment experiment. *Plant Biology*, 11, 60–69. doi:10.1111/j.1438-8677.2009.00230.x

- Hoogenboom G and Jeffrey WW (2004)** Improving Physiological Assumptions Of Simulation Models By Using Gene-Based Approaches. *Agronomy Journal* 95(1)
- Hoogenboom G et White JW (2003)** Modification of a crop simulation model that incorporates gene action. *Agron.J.* (in press).
- Horie T, Yajima M and Nakagawa H (1992)** Yield forecasting. 211-236. In : Teng P.S.,
- Hort M et Scharff L (2016)** Detection of Airborne Volcanic Ash Using Radar. *Volcanic Ash*, 131–160. doi:10.1016/b978-0-08-100405-0.00013-6
- Hort M. et Scharff L (2016) In Mackie S, Cashman K, Ricketts H, Watson M (2016)** Volcanic Ash. Hazard Observation. Book.300 pages.Chapter 8 :Detection of Airborne Volcanic Ash Using Radar.p:131-160 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100405-0.00013-6>.
- Houghton J and Ding T (2000)** Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hsiao T C, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D and Fereres E (2009)** AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal* Volume 101, Issue 3: 448-459. doi: 10.2134/agronj2008.0218s.
- Hu A, Meehl GA, Han W and Yin J (2011).** Effect of the potential melting of the Greenland Ice Sheet on the Meridional Overturning Circulation and global climate in the future. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58 (17-18): 1914–1926. doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.069
- Huang J, Zhang J, Zhang Z, Sun S and Yao J. (2012)** Simulation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method (SDSM). *Theor. Appl. Climatol*, 108, 325
- Hulme M, Doherty R, Ngara T, New M and Lister D (2001)** African climate change: 1900-2100. *Climate Research*, 17(2), 145-168
- Hurrell James W (2003)** The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. American Geophysical Union. ISBN 9780875909943.
- Hyndman RJ and Koehler AB (2006)** Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*. 22 (4): 679–688. doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.
- IISD (2009)** COP 15 Final. Earth Negotiations Bulletin. Vol.12 No. 459. <http://www.iisd.ca/climate/cop15/>

- Iizumi T, Shin Y, Kim W, Kim M and Choi J (2018).** Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Climate Services*. doi:10.1016/j.cliser.2018.06.003.
- Iqbal MA, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E et al (2014)** Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agr Water Manage* 135:61–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.012>.
- Ja Ha K, Kim BH, Chung ES, Chan JCL and Chang CP (2020)** Major factors of global and regional monsoon rainfall changes: natural versus anthropogenic forcing. *Environmental Research Letters* (15):3.
- Jame YW (1992)** Modelling soil moisture for agricultural water management. Pages 69-88. in F. J. Eley, R. Granger and L' Martin
- Jame YW and Cutforth HW (1996)** Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(1), 9–19. doi:10.4141/cjps96-003
- Jame YW and Cutforth HW (1996)** Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(1), 9–19. doi:10.4141/cjps96-003
- Jego G (2008)** Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. Thèse en agrosystèmes, écosystèmes et environnement : Université Toulouse III Paul Sabatier. 229 p.
- Jeong DI and Sushama L (2019)** Projected Changes to Mean and Extreme Surface Wind Speeds for North America Based on Regional Climate Model Simulations. *Atmosphere*, 10(9), 497. doi:10.3390/atmos10090497
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA et al. (2003)** The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265
- Jones JW, Antle JM, Basso B, Boote KJ, Conant RT, Foster I et al. (2017).** Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240–254. doi:10.1016/j.agsy.2016.05.014
- Jones JW, Antle JM, Basso B, Boote KJ, Conant RT, Foster I et al. (2016)** Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269–288. doi:10.1016/j.agsy.2016.09.021

- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ and Ritchie JT (2003)** The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235–265
- Jones JW, Kenig A and Vallejos CE (1999)** Reduced state-variable tomato growth model. *Trans. ASAE* 42 (1), 255–265.
- Joshi MM, Gregory JM, Webb MJ, Sexton DMH and Johns TC (2008)** Mechanisms for the land/sea warming contrast exhibited by simulations of climate change. *Clim Dyn* (30): 455–465
- Kadiyala MDM, Nedumaran S, Singh P, Chukka S, Irshad MA and Bantilan MCS (2015)** An integrated crop model and GIS decision support system for assisting agronomic decision making under climate change. *Sci. Total Environ.* (521):123–134
- Kaiser DP and QianY (2002)** Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954–1998: Indication of increased haze pollution?. *Geophysical Research Letters* 29: doi: 10.1029/2002GL016057. issn: 0094-8276.
- Kaluwin C, Aung TH and Lennon GW (1998)** Climate change sea level. Curriculum Modules for the Pacific Schools. Livre. 106 pages.
- Kaly E, Malou R and Akpo LE (2016)** Évaluation du modèle AquaCrop de la FAO en riziculture irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal. *Journal of Animal & Plant Sciences* (30) : 4781-4796.
- Kang Y, Khan S and Ma X (2009)** Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. *Progress in Natural Science*, 19(12), 1665–1674. doi:10.1016/j.pnsc.2009.08.00
- Karimi T, Stöckle CO, Higgins S and Nelson R (2018)** Climate change and dryland wheat systems in the US Pacific Northwest. *Agr Syst* 159:144–156. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.03.014>
- Katopodis T, Markantonis I, Politi N, Vlachogiannis D and Sfetsos A. (2020)** High-Resolution Solar Climate Atlas for Greece under Climate Change Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, 11(7), 761. doi:10.3390/atmos11070761
- Keating B, Carberry P, Hammer G, Probert M, Robertson M, Holzworth D, Huth N, Hargreaves J, Meinke H and Hochman Z (2003)** An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 267–288
- Kellogg TB (1987)** Glacial-interglacial changes in global deepwater circulation. *Paleoceanography*, 2(3), 259–271. doi:10.1029/pa002i003p00259

- Khan F and Pilz J (2018)** Statistical Methodology for Evaluating Process-Based Climate Models. Proceeding Book of Climate Change and Global Warming Conference, Edited by Ata Amini. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.80984.
- Khandker SR, Bakht Z and Koolwal GB (2009)** The Poverty Impact of Rural Roads: Evidence from Bangladesh. WPS n°3875
- Khebbat Z (2015)** Etat hydrique du sol et performance d'une collection de variétés de blé dur. Université Ferhat Abbas Sétif 1. These de magister. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. 83 p.
- Kiehl JT et Trenberth KE (1997)** Earth's Annual Global Mean Energy Budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(2), 197–208.
- Kiktev DM, Caesar J and Alexander L (2009)** Temperature and precipitation extremes in the second half of the twentieth century from numerical modeling results and observational data. Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 45,284-293.
- Kim HY, Lieffering M, Kobayashi K, Okada M, Mitchell MW et Gumpertz M. (2003)** Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. Field Crops Research, 83(3), 261–270. doi:10.1016/s0378-4290(03)00076-5
- Kimball BA (1983)** Carbon dioxide and agricultural yield ; an assemblage and analysis of 430 prior observations. Agronom J; 75: 779-88.
- Kimball BA, Morris CF, Pinter PJ, Wall GW, Hunsaker DJ, Adamsen FJ et al. (2001)** Elevated CO₂, drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality. New Phytologist, 150(2), 295–303. doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00107.x
- Kirby EJM (1993)** Effect of sowing depth on seedling emergence, growth and development in barley and wheat. Field Crops Res., 35: 101-111.
- Kniveton DR, Layberry R, Williams CJR and Peck M (2009)** Trends in the start of the wet season over Africa. International Journal of Climatology, 29(9), 1216-1225.
- Knutti R (2010)** The end of model democracy? An editorial comment. Clim Change 102: 395–404
- Kourat T (2015)** Analyse et cartographie des pluies et l'incidence de leurs variabilité spatio-temporelle sur la délimitation des zones céréalières dans les hautes plaines orientales de l'Algérie. Magister thesis. Faculté des sciences de la terre, de géographie et de l'aménagement de territoire. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 164 pages.

- Kourat T et Medjerrab A (2016)** Analyse et cartographie des pluies et l'incidence de leurs variabilité spatiotemporelle sur la délimitation des zones céréalières dans les hautes plaines orientales de l'Algérie. *Révue Agric Numéro Spécial 1*:220–229
- Krichak S.O, Alpert P, Bassat K et Kunin P (2007)** The surface climatology of the eastern Mediterranean region obtained in a three member ensemble climate change simulation experiment. *Advances in Geosciences*, 12, 67–80. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal00297021>
- Kumar R et Chaturevdi S (2009)** Crop Modeling: A Tool for Agricultural Research. *Agropedia*. <http://agropedia.iitk.ac.in/?q=content/cropmodel>.
- Kundzewicz ZW, Mata LJ, Arnell NW, Döll P, Kabat P, Jiménez B, Miller KA, Oki T, Sen Z and Shiklomanov IA (2007)** Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Kunkel KE, Bromirski PD, Brooks HE, Cavazos T, Douglas AV, Easterling DR, Emanuel KA, Groisman PY, Holland GJ, Knutson TR, Kossin JP, Komar PD, Levinson DH and Smith, RL (2008)** Observed changes in weather and climate extremes. In: *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands*. [Karl, T.R., Meehl, G.A., Christopher, D.M., Hassol, S.J., Waple, A.M., and Murray, W.L. (eds.)]. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC, pp. 222. la dépendance alimentaire comme phénomène durable en Algérie. *Revue sciences humaines*. n°39 : 133-158.
- Larbi A, Mekliche A, Abed R et Badis M. (2000)** Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) en région semi-aride. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza : CIHEAM, 2000. p. 295-297 (*Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens*; n. 40).
- Latief A et Syed SM (2018)** *Satellite Farming. An information and technology based agriculture*. 181 pages. Livre edité par Springer.
- Le Roux R, Katurji M, Zawar-Reza P, Quenol H and Sturman A. (2017)**. Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the WRF model. *Environmental Modelling & Software* (100): 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.002>

- Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, Ding Y, Mauritzen C, Mokssit A, Peterson T and Prather M, (2007)** Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP and Ort DR (2009).** Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859–2876. doi:10.1093/jxb/erp096
- Leggett J, Pepper WJ, Swart RJ, Edmonds J, Meira Filho LG, Mintzer I, Wang MX and Watson J (1992)** "Emissions Scenarios for the IPCC: an Update", Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, UK, pp. 68-95
- Leng G, Zhang X, Huang M, Yang Q, Rafique R, Asrar GR and Ruby Leung L. (2016).** Simulating county-level crop yields in the Conterminous United States using the Community Land Model: The effects of optimizing irrigation and fertilization. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(4), 1912–1931. doi:10.1002/2016ms000645
- Lesk C, Rowhani P and Ramankutty N (2016)** Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87. doi:10.1038/nature16467
- Letort V, Mahe P, Cournede PH, De Reffye P, Courtois B (2008)** Quantitative genetics and functional-structural plant growth models: simulation of quantitative trait loci detection for model parameters and application to potential yield optimization. *Annals of Botany* 101: 1243-1254.
- Li H, Dai A, Zhou T et Lu J (2010)** Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000. *Clim. Dyn.*, 34, 501–514..
- Li T and Kim G (2019)** Impacts of Climate Change Scenarios on Non-Point Source Pollution in the Saemangeum Watershed, South Korea. *Water*, 11(10), 1982. doi:10.3390/w11101982
- Lindsey LE, Paul P and Lentz E (2017)** Wheat growth stages and associated management. AGF-126
- Linnemann H, De Hoogh J, Keyzer MA and Van Heemst HDJ. (1979)** MOIRA, Model of International Relations in Agriculture. Report of the Project Group, Food for a Doubling World Population, Amsterdam.

- Lipiec J, Doussan C, Nosalewicz A and Kondracka K (2013)** Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: A review. *Institute of Agrophysics*, 2017(27): 463-477.
- Liu Z, Liu X, Cao W and Zhu Y(2013)** Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China. *Agric. For. Meteorol.* 171, 234–248.
- Liu DL, Wang B, Evans J, Ji F, Waters C, Macadam I, Yang X and Beyer K (2018)** Propagation of climate model biases to biophysical modeling can complicate assessments of climate change impact in agricultural systems. *Int J Climatol* 39 (1): 424–444. <https://doi.org/10.1002/joc.5820>
- Liu H, Li Y, Josef T, Zhang R and Huang G (2013)** Quantitative estimation of climate change effects on potential evapotranspiration in Beijing during 1951–2010. *Journal of Geographical Sciences*, 24(1), 93–112. doi:10.1007/s11442-014-1075-5.
- Lobell DB (2003)** Climate and Management Contributions to Recent Trends in U.S. Agricultural Yields. *Science*, 299(5609), 1032–1032. doi:10.1126/science.1077838
- Lobell DB (2007)** Changes in diurnal temperature range and national cereal yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(3-4), 229–238. doi:10.1016/j.agrformet.2007.05.002
- Lobell DB and Field CB (2007)** Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* 2, 014002.
- Lobell DB and Field CB (2007)** Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming; *Environmental Research Letters*, 2 014002
- Lobell DB, Schlenker W et Costa-Roberts J (2011)** Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. doi:10.1126/science.1204531
- Lockwood, M., Owens, M., Hawkins, E., Jones, G. SetUsoskin, I. (2017)** Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age. *Astronomy & Geophysics*, 58 (2). 2.172.23. ISSN 1366 8781. doi: <https://doi.org/10.1093/astrogeo/atx057> <http://centaur.reading.ac.uk/69443/>
- Long SP (2006)** Food for Thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312(5782):1918–1921. <https://doi.org/10.1126/science.1114722>
- Loue A (1982)** Le potassium et les céréales Dossier K₂O n°02, pp 1-41
- Luhunga PM (2017).** Assessment of the Impacts of Climate Change on Maize Production in the Southern and Western Highlands Sub-agro Ecological Zones of Tanzania. *Frontiers in Environmental Science*, 5. doi:10.3389/fenvs.2017.00051

- Luo Q (2011)** Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic Change*, 109(3-4), 583–598. doi:10.1007/s10584-011-0028-6
- MADR (2020)** Données statistiques, série B. Service statistiques de Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural.
- Maldonado-Ibarra I, Rodríguez GR et Castillo-Rosales D (2013)** Determination of genetic coefficients of three spring wheat varieties under a Mediterranean environment applying the DSSAT model. *Chilean journal of agricultural research* 75 (4), doi: 10.4067/S0718-58392015000500006.
- Mall RK., Lal M, Bhatia VS, Rahore LS and Singh R. (2004)** Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology* (121): 113–125. doi.org/10.1016/S0168-1923 (03) 00157-6.
- Manderscheid R, Burkart S, Bramm A and Weigel HJ (2003)** Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *European Journal of Agronomy*, 19(3), 411–425. doi:10.1016/s1161-0301(02)00133-8
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ et al. (2010)** Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48, RG3003.
- Marcellos H and Single WV (1984)** Frost Injury in Wheat Ears After Ear Emergence. *Functional Plant Biology* 11, 7-15. <https://doi.org/10.1071/PP9840007>
- Martin E, Timbal B et Brun E (1997)**. Downscaling of general circulation model outputs: simulation of the snow climatology of the French Alps and its sensitivity to climate change. *Clim. Dyn.*13
- Mascaro G, Viola F, Deidda R (2018)** Evaluation of precipitation from EURO-CORDEX regional climate simulations in a small-scale Mediterranean Site. *J Geophys Res.* "https://doi.org/10.1002/2017jd027463" <https://doi.org/10.1002/2017jd027463>
- Masle-Meynard J (1980)**. L’élaboration du nombre d’épis chez le blé d’hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l’utilisation de l’azote et de la lumière. Thèse Docteur Ingénieur. INA-PG. Paris
- MATE (2015)** Etude diagnostique sur la biodiversité et les changements climatiques en Algérie. Cooperation project between the Algerian Ministry of land planning and the environment (MATE), United Nations Development Program (UNDP) and Global Environment Facility (GEF). Final report. p 111

- Mavromatis T, Boote KJ, Jones JW, Irmak A, Shinde D and Hoogenboom G. (2001).** Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Science* 41, 40-51.
- Mc Phaden (2002)** El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change, Volume 1. pp 353–370.
- McCann HC, Rikkerink EHA, Bertels F, Fiers M, Lu A, Rees-George J, Andersen MT, Gleave AP, Haubold B, Wohlers MW et al. (2013).** Genomic analysis of the kiwifruit pathogen *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* provides insight into the origins of an emergent plant disease. *PLoS Pathog.* 9. Newman, J.A., Gibson, D.J., Parsons, A.J., Thornley, J.H.M., 2003. How predictable are aphid population responses to elevated CO₂. *J. Anim. Ecol.* 52, 556–566
- Meddi MM, Assani AA and Meddi H (2010)** Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management*, 24(14), 3817–3833. doi:10.1007/s11269-010-9635-7
- Meehl GA et al. (2007)** Global climate projections, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 747–845, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- MEER et GIZ (2019)** Plan national pour le climat de l'Algérie établi par le ministère de l'Environnement et des Énergies renouvelables (MEER) et le Deutsche Gesellschaft für International Zusammenarbeit (GIZ). p 60
- Mian MAR et Nafziger ED (1994)** Seed size and water potential effects on germination and seedling growth of winter wheat. *Crop Sci.*, 34: 169-171
- Mina U, Singh S, Singh B, Tiwari S, Singh D and Kumar P (2019)** Assessment of low intensity solar radiation susceptibility in 20 wheat varieties under field conditions grown in Indo-Gangetic Plains of India. *J Crop Sci Biotechnol* 22:193–203. <https://doi.org/10.1007/s12892-018-0134-0>
- Mo XG, Hu S, Lin ZH, Liu SX and Xia J (2017)** Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. *Advances in Climate Change Research*, 8(2), 93–98. doi:10.1016/j.accre.2017.05.007
- Mosiniak M, Prat R and Roland JC (2006)** De blé au pain. *Biologie et Multimédia - Sorbonne Université-UFR des Sciences de la Vie.* <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/blepain/1ble/11plant/plante.htm>.

- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J et al. (2008)** Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. IPCC, Geneva, 132 p.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Martin RM, Rose SK, Vuuren DPV, Carteret TR et al. (2010)** The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* (463): 747-756. doi:10.1038/nature08823.
- MRE. (2018)** Prise en charge de la problématique des inondations. Conférence Nationale sur les risques majeurs CIC / 22-23 octobre 2018.
- Müller C, Elliott J and Levermann A (2014)** Fertilizing hidden hunger. *Nat. Clim. Change* 4, 540–541. doi: 10.1038/nclimate2290
- Muller M. (2016)** The impacts of future climate change on land and water productivity of staple crops: a case study for China. Master thesis, University of Twente. 36 pages
- Murray-Tortarolo GN, Jaramillo VJ and Larsen J. (2018).** Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253-254, 124–131. doi:10.1016/j.agrformet.2018.02.011
- Mutua J, Notenbaert A, Paul Bi, Rahimi J and Butterbach-Bahl K (2020)** Heat Stress Assessment for Dairy Cattle and Pig in Uganda. Rapport de projet de. 28 pages.
- Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, Huybers P, Leakey ADB, Bloom AJ et al. (2014)** Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139–142. doi:10.1038/nature13179
- Nakicenovic N, Kolp P, Riahi K, Kainuma M and Hanaoka T (2006)** Assessment of emissions scenarios revisited. *Environmental Economics and Policy Studies*, 7(3), 137–173. doi:10.1007/bf03353998
- Nalam V, Vales MI, Watson CJW, Kianian SF and Riera-Lizarazu O (2006)** Map based analysis of genes affecting the brittle rachis character in tetraploid wheat (*Triticum turgidum*). *Theor. Appl. Genet.* 112: 373–381
- National Research Council (2010)** Advancing the Science of Climate Change. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12782>.
- Neupane J and Guo W (2019)** Agronomic Basis and Strategies for Precision Water Management: A Review. *Agronomy*, 9(2), 87. doi:10.3390/agronomy9020087
- Nicholls SIN, Easterling D, Goodess CM, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C and Zhang X (2012)** Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In:

Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation

NOAA (2020) Teacher background: natural climate change. Livreh https://www.esrl.noaa.gov/gmd/education/info_activities/pdfs/TBI_natural_climate_change.pdf

Nonhebel S (1996) Effects of temperature rise and increase in CO₂ concentration on simulated wheat yields in Europe. *Climatic Change* 34(1):73–90. <https://doi.org/10.1007/BF00139254>

Norris JR and Wild M (2009) Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming,” and solar “brightening.” *Journal of Geophysical Research*, 114. doi:10.1029/2008jd011378

Nouaceur Z, Laignel B et Turki I (2013) Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Physio-Geo (7)* : 307-323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>

Nouri M, Homae M, Bannayan M and Hoogenboom G (2017) Towards shifting planting date as an adaptation practice for rainfed wheat response to climate change. *Agricultural Water Management*, 186, 108–119. doi:10.1016/j.agwat.2017.03.004

Nowak RS, Ellsworth D S and Smith SD (2004) Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂- do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist*, 162(2), 253–280. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01033.x

NRC (1994) Solar influence on global change. National research council. Livre. 180 pages.

O’Gorman, PA and CJ Muller (2010) How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environ. Res. Lett.*, 5, 025207.

O’Leary G. J, Christy B, Nuttall J, Huth N, Cammarano D, Stöckle C et al. (2015). Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. *Global Change Biology*, 21(7), 2670–2686. doi:10.1111/gcb.12830

O’Sullivan J, Parnell A and Sweeney C (2015) Projecting climate extremes in Ireland using extreme value theory’ Conference on Applied Statistics in Ireland. p :52-53. 11th – 13 th May 2015. University Coliege Cork, Ireland.

- Ochieng J, Kirimi L and Mathenge M. (2016)** Effects of climate variability and change on agricultural production: The case of small scale farmers in Kenya. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, 71–78. doi:10.1016/j.njas.2016.03.005
- OMM (2019)** The Global Climate in 2015–2019. World Meteorological Organization publication. p 20
- OMM (2020)** État du climat en Afrique. Rapport N°1253 de l'Organisation Mondiale de la météorologie. 34 pages.
- OMS (2015)** Climate and health country profile – 2015 Algeria. file:///C:/Users/USER/Downloads/WHO-FWC-PHE-EPE-15.32-eng%20(2).pdf. 6 pages.
- Oteng-Darko P, Yeboah S, Addy SNT, Amponsah S and Owusu Danquah E (2013)** Crop modeling: A tool for agricultural research – A review. *Journal of Agricultural Research and Development* Vol. 2(1). pp. 001-006
- Pang XP, Letey J and Wu L (1997)** Yield and Nitrogen Uptake Prediction by CERES-Maize Model under Semiarid Conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 254. doi:10.2136/sssaj1997.036159950061000100
- Paymard P, Bannayan M and Haghghi RS (2018)** Analysis of the climate change effect on wheat production systems and investigate the potential of management strategies. *Natural Hazards*, 91(3), 1237–1255. doi:10.1007/s11069-018-3180-8
- Paymard P, Yaghoubi F, Nouri M and Bannayan M (2019)** Projecting climate change impacts on rainfed wheat yield, water demand, and water use efficiency in northeast Iran. *Theor Appl Climatol*. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02896-8>
- Pecetti L and Hollington PA (1997)** Application of the CERES-Wheat simulation model to durum wheat in two diverse mediterranean environments. *European Journal of Agronomy*, 6(1-2), 125–139. doi:10.1016/s1161-0301(96)02039-4
- Peng J, Sun D and Nevo E (2011)** Wild emmer wheat, *Triticum dicoccoides*, occupies a pivotal position in wheat domestication process. *AJCS* 5(9):1127-1143
- Peng S, Huang J, Sheehy JE, Laza RC, Visperas RM, Zhong X, Centeno GS, Khush GS, and Cassman KG (2004)**. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(27), 9971–9975. doi:10.1073/pnas.0403720101
- Penning de Vries FWT, Brunsting AB and Van Laar HH (1974)** Products, requirements and efficiency of biological synthesis, a quantitative approach. *J. Theor. Biol.* 45: 339-377

- Pepper WJ, Leggett RJ, Swart RJ, Wasson J, Edmonds J and Mintzer I. (1992)** Emission Scenarios for the IPCC An Update, Assumptions, Methodology, and Results, US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Philander SG (2001)** El Niño Southern Oscillation (Enso) Models. Encyclopedia of Ocean Sciences, 827–832. doi:10.1006/rwos.2001.0401
- Pielke RA, Marland G, Betts R.A, Chase TN, Eastman JL, Niles JO and Running SW (2002).** The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1797), 1705–1719. doi:10.1098/rsta.2002.1027
- Porter JR and Semenov MA (2005)** Crop responses to climatic variation. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360(1463), 2021–2035. doi:10.1098/rstb.2005.1752
- productivity. Irrig. Sci., 25: 189-207.
- Pugh TAM, Müller C, Elliott J, Deryng D, Folberth C, Olin Set al (2016)** Climate analogues suggest limited potential for intensification of production on current croplands under climate change. Nat Commun 7:12608. <https://doi.org/10.1038/ncomms12608>
- Rabbinge R, Ward SA and Van Laar HH (1989)** Simulation and systems management in crop protection. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen Simulation monographs (32), 416 pages. ISBN 90-220-0899, Netherlands.
- Rader M, Kirshen P, Roncoli C, Hoogenboom G and Ouattara F (2009)** Agricultural risk decision support system for resource-poor farmers in Burkina Faso, West Africa. J. Water Resour. Plan.Manag. 135, 323–333.
- Raes D (2012)** The ETo Calculator. Reference Manual, Version 3.2. Food and Agriculture Organization of the United Nations.Land and Water Division.38 p.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2014)** AquaCrop. Version 4.0. Manuel d’utilisation. FAO, Land and Water Division, Rome, Italy
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2016)** AquaCrop Version 5.0 Reference Manual. Annex I. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
- Rahmstorf S (2007)** Glacial climates.In Scott AE (2007) Thermohaline Circulation, in Encyclopedia of Quaternary Science.Livre.3576 pages.

- Rajeevan M, Bhate J and Jaswal AK (2008)** Analysis of variability and trends of extreme rainfall events over India using 104 years of gridded daily rainfall data. *Geophysical Research Letters*, 35, L18707.
- Ramankutty N et Foley JA (1999)** Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Glob.Biogeochem. Cycles* 13, 997–1027..
- Ramankutty N, Evan AT, Monfreda C and Foley JA (2008).** Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical*
- Rashid MA, Jabloun M, Andersen MN, Zhang X, Olesen JE (2019)** Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agr Water Manage* 222:193–203. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.004>
- Reddy PP (2015)** Climate Resilient Agriculture for Ensuring Food Security. doi:10.1007/978-81-322-2199-9
- Reder A, Raffa M, Montesarchio M, Mercogliano P (2020)** Performance evaluation of regional climate model simulations at different spatial and temporal scales over the complex orography area of the Alpine region. *Nat Hazards* 102:151–177. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03916-x>
- Regmi J (2013)** Physics behind the climate tions and the global sea surface temperature record. *Journal of Geophysical Research*, 96(D2), 2835. doi:10.1029/90jd02274
- Rezzoug W and Gabrielle B (2015)** Simulation of climate change impact on wheat production in the Tiaret region of Algeria using the DSSAT model. *ESJ* (11) 9: 249–259
- Rimmington G M and Charles-Edwards DA (1987)** Mathematical descriptions of plant growth and development. Book chapter : Plant growth modeling for resource management. Volume 1.Current models and methods. 1987 pp.3-15 ref.37
- Ritchie JT (1998)** Soil water balance and plant water stress. *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*, 41–54. doi:10.1007/978-94-017-3624-4_3
- Roberts MJ, Schlenker W and Eyer J (2012)** Agronomic Weather Measures in Econometric Models of Crop Yield with Implications for Climate Change. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(2), 236–243. doi:10.1093/ajae/aas04
- Robinson PJ and Henderson-Sellers A (1999)** The earth's radiation budget. In *Contemporary climatology*. Essex, United Kingdom: Pearson Education, 17–34.
- Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D and Hobbins M T (2007)** On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 34(17). doi:10.1029/2007gl031166.

- Rodriguez D and Sadras V (2007)** The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand. *Aust. J. Agric. Res* (58) : 287–302
- Rodriguez D, de Voil P, Hudson D, Brown JN, Hayman P, Marrou H and Meinke H. (2018)** Predicting optimum crop designs using crop models and seasonal climate forecasts. *Scientific Reports*, 8(1).doi:10.1038/s41598-018-20628-2
- Romera R, Sánchez E, Domínguez M, Gaertner M and Gallardo C (2015)** Evaluation of present-climate precipitation in 25 km resolution regional climate model simulations over Northwest Africa. *Climate Research*, 66(2), 125–139. doi:10.3354/cr01330
- Rosenzweig C and Wilbanks TJ (2010)** The state of climate change vulnerability, impacts, and adaptation research: strengthening knowledge base and community. *Climatic Change*, 100(1), 103–106. doi:10.1007/s10584-010-9826-5
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Arneth A, Boote KJ, Folberth C, Glotter M, Müller C, Neumann K, Piontek F, Pugh T, Schmid E, Stehfest E and Jones JW (2013 b)** Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proc. Natl. Acad. Sci.* <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222463110>.
- Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, Boote KJ, Thorburn P, Antle JM, Nelson GC, Porter C, Janssen S, Asseng S, Basso B, Ewert F, Wallach D, Baigorría G et Winter JM, (2013 a).** The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies. *Agric. For. Meteorol. J.* 170, 166–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>.
- Rossiter DG (2003)** Biophysical models in land evaluation. Article 1.5.27 in Theme 1.5 Land use and land cover. In : *Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*. Oxford: EOLSS.
- Rossiter J (2003)** *Model-Based Predictive Control: A Practical Approach*, Livre, CRC Press, 344 p.
- Rötter RP, Carter TR, Olesen JE, Porter JR (2011)** Cropclimate models need an overhaul. *Nat Clim Change* 1: 175–177
- Rouabhi A, Adouane C and Felloussia AL (2019)** Assessment of climate change and its effects on cereal production by 2070 in north Algeria. *Revue Agriculture*. 10 (2) : 27 – 39

- Rowhani P, Lobell DB, Linderman M and Ramankutty N (2011)** Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(4), 449–460. doi:10.1016/j.agrformet.2010.12.002
- Ruddiman WF (2006)** Orbital changes and climate. *Quaternary Science Reviews* (25): 3092–3112
- Rummukainen M (1997)** Methods for statistical downscaling of GCM simulations. *Reports Meteorology and Climatology*, No 80, , Rossby Centre, SMHI, 29 pages.
- Ruosteenoja K and Räisänen P (2013)** Seasonal changes in solar radiation and relative humidity in Europe in response to global warming. *J. Climate*, 26, 2467–2481, doi:10.1175/JCLI-D-12-00007.1..
- Saadi S, Todorovic M, TanasijevicL, Pereira L S, Pizzigalli C and Lionello P (2015)** Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agr Water Manage* 147:103–115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
- Sachindra DA, Huang F, Barton A, Perera BJC. (2014)** Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation—part 2: bias-correction and future projections. *International journal of climatology* N°34 (11): 3282-3303 <https://doi.org/10.1002/joc.3915>.
- Sage RF, Santrucek J and Grise DJ (1995)** Temperature effects on the photosynthetic response of C3 plants to long-term CO2 enrichment. *Vegetatio* 121:67–77. <https://doi.org/10.1007/BF00044673>
- Saha D and Mondal MS. (2016).** Assessing the impacts of climate change on dry season crop yields using the AquaCrop model. *International Conference on Sustainable Development (ICSD 2016)*, Dhaka.
- Saulescu NN and Kronstad WE (1995)** Growth Simulation Output for Detction of Differential Response to Environmental Factors. *Crop Science* 35 : 773-778.
- Savary S, Teng PS, Willocquet L, Nutter Jr FW (2006)** Quantification and modeling of crop losses: a review of purposes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44, 89–112.
- Saxton K.E and Willey PH (2009)** The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *USDA.Agricultural Research Service*.39 pages.
- Schaller N, Kay AL, Lamb R, Massey NR, van Oldenborgh GJ, Otto FEL et al. (2016)** Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts. *Nature Climate Change*, 6(6), 627–634. doi:10.1038/nclimate2927

- Schlenker W and Lobell DB (2010)** Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environ Res Lett* 5(1):014010. doi:10.1088/1748-9326/5/1/014010
- Seligman NG and van Keulen H (1981)** A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel, M.J., Van Veen, J.A. (Eds.), *Simulation of Nitrogen Behaviour of Soil-Plant Systems*. Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 192–220 (1981).
- Shaka AK (2008)** Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abbay Catchment in Lake Tana Basin, Ethiopia Enschede, Netherlands. The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation: Master Thesis.
- Shavrukov Y, Kurishbayev A, Jatayev S, Shvidchenko V, Zotova L, Koekemoer F et al. (2017)** Early Flowering as a Drought Escape Mechanism in Plants: how can it Aid Wheat Production? *Front. Plant Sci.* 8 (1950).doi: 10.3389/fpls.2017.01950.
- Sheffield J and Wood EF (2008 a)** Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, 21(3), 432-458
- Shepherd TG (2019)** Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proc. R. Soc. A* 475: 20190013. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2019.0013>
- Shi W, Tao F and Zhang Z (2013).** A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields. *Journal of Geographical Sciences*, 23(3), 567–576. doi:10.1007/s11442-013-1029-3
- Shorter R, Lawn RJ and Hammer GL (1991)** Improving genotypic adaptation in crops - A role for breeders, physiologist and modellers. *Experimental Agriculture* 27 : 155-175.
- Silva VPR, Silva RA, Maciel GF, Braga CC et al. (2017)** Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Cienc Rural* (48)1:8. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161118>
- Simpson BM (2017)** Preparing Smallholder Farm Families to Adapt to Climate Change. Pocket Guide 2: Managing crop resources. Catholic Relief Services: Baltimore, MD, USA
- Singh AK (1994)** Crop Growth Simulation Models. Water Technology Centre, I.A.R.I., Library Avenue, New Delhi, pp. 497-509..
- Smadhi (2011)** Régionalisation et modélisation agroclimatique en céréaliculture Pluviale. Cas du Nord de l'Algérie. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, 156 p, ENSA El-Harrach, Alger.

- Soltner D (1990)** les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairie. Coll. Sciences et techniques agricoles. 17^{ème} Ed.464p
- Spilde LA (1989)** Influence of seed size and test weight on several agronomic traits of barley and hard red spring wheat. *J. Prod. Agric.*, 2: 169-172.
- Stanhill G and Cohen S (2001)** Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(4), 255–278. doi:10.1016/s0168-1923(00)00241-0.
- Steduto P, Hsia TCD Raes et Fereres E (2009)** AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* (101) 3: 426-437.
- Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2007)** On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig Sci* 25, 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E and Raes D (2012)** Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper Nr. 66. Rome, Italy.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E (2008)** AquaCrop — The FAO Crop Model to Predict Yield Response to Water: I Concepts. *Agron J special issue*
- Stern N (2006)** The economic effects of climate change. *The sterns review*. Book.576 p.
- Stöckle CO, Donatelli M and Nelson R (2003)** CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 289–307. doi:10.1016/s1161-0301(02)00109-0
- Stöckle CO, Higgins S, Nelson R, Abatzoglou J, Huggins D, Pan et al. (2017)** Evaluating opportunities for an increased role of winter crops as adaptation to climate change in dryland cropping systems of the U.S. Inland Pacific Northwest. *Climatic Change*, 146(1-2), 247–261. doi:10.1007/s10584-017-1950-z
- Sultan B and Gaetani M (2016)** Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change and impacts scenarios, and Potential for Adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7. doi:10.3389/fpls.2016.01262
- Tack JB and Ubilava D (2015)** Climate and agricultural risk: measuring the effect of ENSO on U.S. crop insurance. *Agricultural Economics*, 46(2), 245–257. doi:10.1111/agec.12154
- Taibi and Souag-Gamane (2012)** Impact of climate change in northern Algeria: current tendency of precipitation and temperature. *Communication*.10 pages. . International

- Conference MarCoastEcos 2012, Climate changes and their impacts; climatology; meteorology. Tirana, Albania
- Tan K, Zhou G, Lv X, Guo J and Ren S (2018)** Combined effects of elevated temperature and CO₂ enhance threat from low temperature hazard to winter wheat growth in North China. *Sci Rep-UK*8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22559-4>
- Tao F and Zhang Z (2013)** Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: a new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agric For Meteorol* 170:146–165. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.003>
- Tao F, Yokozawa M, Xu Y, Hayashi Y and Zhang Z (2006)** Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1-4), 82–92. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.014
- Terray L, Page C, Déqué M and Flecher C (2012)** L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. Livre Vert du projet CLIMATOR, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Ed. ADEME, 336p
- Teutschbein C and Seibert J (2012)** Correction des biais des simulations climatiques régionales en sortie de modèle aux fins de l'étude des impacts des changements climatiques hydrologiques : examen et évaluation de différentes méthodes. *Journal of Hydrology* 456–457:12–29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052
- Textor C, Graf HF, Timmreck C and Robock A (2004)** Emissions from volcanoes. In *Emissions of atmospheric trace compounds* (pp. 269-303). Springer, Dordrecht.
- Thompson LM (1969) Weather and technology in the production of wheat in the United States.
- Toggweiler JR and Key RM (2001)** Thermohaline Circulation. In *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Ed. Turekian (2001) 3399 pages.
- Tomozeiu R, Agrillo G, Cacciamani C and Pavan V (2013)** Statistically downscaled climate change projections of surface temperature over Northern Italy for the periods 2021–2050 and 2070–2099. *Nat Hazards* 72(1):143–168. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0552-y>
- Tramblay Y, El Adlouni S and Servat E (2013)** Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3235–3248. doi:10.5194/nhess-13-3235-2013
- Tramblay Y, Ruelland D, Hanich L and Dakhloui H (2016)** Hydrological impacts of climate change in North African countries. In : Thiébaud S. (ed.), Moatti Jean-Paul (ed.). *The Mediterranean region under climate change : a scientific update*. Marseille :

- IRD ; AllEnvi, 295-302. (Synthèses). COP. Convention des Parties de la convention Cadre des Nations Unies sur le Changement climatique, 22, Marrakech (MAR)
- Tramblay Y, Ruelland D, Somot S, Bouaicha R and Servat E (2013)** High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3721–3739, <https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013>
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling D, Klein TA, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Solden B and Zhai P (2007)** Observations: Surface and atmospheric climate change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, pp. 235-336.
- Trzaska S et Schnarr E (2014)** A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD, pp 1–42
- Tsuji GY, Uehara G and Balas S (1994)** Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii
- Tubiello FN, Amthor JS, Boote KJ, Donatelli M, Easterling W, Fischer G, Gifford RM, Howden M, Reilly J and Rosenzweig C (2007 c)** Crop response to elevated CO₂ and world food supply: a comment on “Food for Thought” by Long et al. *Science* 312:1918–1921, *Eur. J Agron* 25:215–23. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.002>
- Tubiello FN, Amthor JS, Boote KJ, Donatelli M, Easterling W, Fischer G et al. (2007 a)** Crop response to elevated CO₂ and world food supply. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 215–223. doi:10.1016/j.eja.2006.10.002.
- Tubiello FN, Soussana, JF, Howden SM and Easterling W (2007 b)** Crop and pasture response to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 19686-19690, doi:10.1073/pnas.0701728104
- UNFCC (2007 a)** Climate change impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries. United Nations Framework Convention on Climate Change, 64p
- UNFCC (2007 a)** Climate change: impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCC). Bonn, Germany. Book, 64 p

- UNFCC (2007 b)** Uniting on climate. A guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol. 39 pages.
- UNISDR (2013)** United Nations Office for Disaster Risk Reduction. The Pocket GAR 2013 – From Shared Risk to Shared Value: the Business Case for Disaster Risk Reduction.
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ (2005)** The ERA-40 reanalysis. Quarterly J. Royal Meteorological Society, 131(612), 2961–3012, doi: 10.1256 qj.04.176.
- Van Ittersum M, Leffelaar P, van Keulen H, Kropff M, Bastiaans L et Goudriaan J (2003)** On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy, 18(3-4), 201–234. doi:10.1016/s1161-0301(02)00106-5
- Van Ittersum MK, Ewert F, Heckelei T, Wery J, Alkan OJ and Andersen E et al. (2008)** Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). Agricultural Systems 96, 150-165.
- Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK et al. (2014)** AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. Environ Modell Software 62:351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Wahid A, Gelani S, Ashraf M and Foolad M (2007)** Heat tolerance in plants: An overview. Environmental and Experimental Botany, 61(3), 199–223. doi:10.1016/j.envexpbot.2007.05.011
- Wallach D and Goffinet B (1987)** Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. Biometrics (43): 561–576.
- Wang B (2017)** Modelling impacts of climate variability and change on wheat cropping across New South Wales. These de Doctorat en Philosophie. School of life Sciences. Faculty of Sciences. University of Technology de Sydney. 140 pages..
- Wang B et Ding QH (2006)** Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. Geophysical Research Letters, 33, L06711.
- Wang B, Feng P, Chen C, Liu D L, Waters C and Yu Q (2019)** Designing wheat ideotypes to cope with future changing climate in South-Eastern Australia. Agr Syst 170:9–18. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.005>
- Wang E and Engel T (2002)** Simulation of growth, water and nitrogen uptake of a wheat crop using the SPASS model. Environmental Modelling & Software 17, 387-402.
- Wang Y, Xie Z, Malhi SS, Vera CL, Zhang Y and Wang J (2009)** Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. Agricultural Water Management, 96(3), 374–382. doi:10.1016/j.agwat.2008.09.012

- Wang Y, Xie Z, Malhi SS, Vera CL, Zhang Y and Wang J (2009)** Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 96(3), 374–382. doi:10.1016/j.agwat.2008.09.012
- Ward N, Bucchignani E, Montesarchio M, Zollo A, Rianna G, Mancosu N and Bacciu V (2015)** Descendre l'échelle de la modélisation climatique pour des informations climatiques et une évaluation d'impact à haute résolution. *Clima South*, Manuel n°6, Séminaire Lecce, Italie 9 - 20 mars.
- Wardlaw IF and Wrigley CW (1994)** Heat tolerance in temperate cereals – an overview. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21 : 695–703.
- Webster PJ, Magafia VO, Palmer TN, Shukla J, Tomas RA, Yanai M and Yasunari T (1998)** Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of geophysical research*, VOL. 103, NO. C7, pages 14,451-14,510
- Wheeler T and Braun JV (2013)** Climate change impacts on global food security. *Science* 341 (6145): 508-513. DOI: 10.1126/science.1239402.
- Whish JPM, Herrmann NI, White NA, Moore AD and Kriticos DJ (2015)** Integrating pest population models with biophysical crop models to better represent the farming system. *Environ. Model.Softw.*72, 418–42 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.ppat.1003503> e1003503
- Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long CN, Dutton EG, Forgan B, Kallis A, Russak V and Tsvetkov A (2005)** From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science* 308, 847–850, [Http://dx.doi.org/10.1126/science.1103215](http://dx.doi.org/10.1126/science.1103215)
- Wild M (2009)** Global dimming and brightening: a review. *J. Geophys. Res.* 114, D00D16, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011470>.
- Wild M (2015)** Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 91–107. doi:10.1002/wcc.372
- Wilkerson GG, Jones JW, Boote KJ, Ingram KT and Mishoe JW (1983)** Modeling soybean growth for crop management. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 26, 63–73.
- Williams JR, Jones CA, Dyke and PT (1984)** A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE* 27(1):129-14

- Willmott CJ (1982)** Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313. doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2
- Wills RCJ, Battisti DS, Armour KC, Schneider T and Deser C (2020)** Pattern Recognition Methods to Separate Forced Responses from Internal Variability in Climate Model Ensembles and Observations. *Journal of climate*. V 33 (20): 8693–8719. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0855.1>.
- WMO (2014)** World Meteorological Organization. Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2012). (WMO, 2014)
- WMO (2019)** The Global Climate in 2015–2019. Publication N°9936. World Meteorological Organization. 21 pages.
- Wollenweber B, Porter JR and Schellberg J (2003)** Lack of Interaction between Extreme High-Temperature Events at Vegetative and Reproductive Growth Stages in Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189(3), 142–150. doi:10.1046/j.1439-037x.2003.00025.x
- Wunsch C (2002)** What Is the Thermohaline Circulation?, *Science*, vol. 298 (8): 1179–1181 ISSN 0036-8075 et 1095-9203, PMID 12424356, DOI 10.1126/science.1079329
- Xiao D, Bai H and Liu DL (2018)** Impact of future climate change on wheat production: A simulated case for china's wheat system. *Sustainability-Basel* 10(4):1277. <https://doi.org/10.3390/su10041277>
- Xiao L, Liu L, Asseng S, Xia Y, Tang L, Liu B et al. (2018)** Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 154–164. doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.006
- Xiong W, Holman I, Lin E, Conway D, Li Y and Wu W (2012)** Untangling relative contributions of recent climate and CO2 trends to national cereal production in China. *Environ Res Lett* 7(4):044014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044014>
- Xu B and Clayton DA (1995)** A persistent RNA-DNA hybrid is formed during transcription at a phylogenetically conserved mitochondrial DNA sequence. *Molecular and Cellular Biology*, 15(1), 580–589. doi:10.1128/mcb.15.1.580
- Xu Z, Shimizu H, Yagasaki Y, Ito S, Zheng Y and Zhou G (2013)** Interactive effects of elevated CO2, drought, and warming on plants. *J Plant Growth Regul* 32 (4):692–707
- Yadav SS, Hunter D, Redden R, Nang M, Yadava DK and Habibi AB (2015)** Impact of Climate Change on Agriculture Production, Food, and Nutritional Security, *Crop Wild*

- Relatives and Climate Change, Eds R. Redden, S.S. Yadav, N. Maxted et al. (2015) John Wiley & Sons, Inc. pp. 1–23.
- Yang X, Asseng S, Wong MTF, Yu Q, Li J and Liu E (2013)** Quantifying the interactive impacts of global dimming and warming on wheat yield and water use in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182-183, 342–351. doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.006
- Yao F, Qin P, Zhang J, Lin E and Boken V (2011)** Uncertainties in assessing the effect of climate change on agriculture using model simulation and uncertainty processing methods. *Chinese Science Bulletin*, 56(8), 729–737. doi:10.1007/s11434-011-4374-6
- Yeşilköyb S and Şaylan L (2020)** Assessment and modelling of crop yield and water footprint of winter wheat by aquacrop. *Ital J Agrometeorol* 3:3–14. <https://doi.org/10.13128/ijam-859>
- Yin Z, Feng Q, Yang L, Deo R C, Adamowski JF, Wen X et al. (2019)** Projected spatial patterns in precipitation and air temperature for China’s northwest region derived from high-resolution regional climate models. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.6435.
- Yotova A (2009)** *Climate Change, Human Systems and Policy*. Volume 1, 408 p.
- You L, Wood-Sichra U, Fritz S, Guo Z, See L and Koo J (2014)** Spatial Production Allocation Model (SPAM), 2005 v2.0. [date] Available from <http://mapspam.info>
- Yu Q, Li L, Luo Q, Eamus D, Xu S, Chen C et al. (2013)** Year patterns of climate impact on wheat yields. *Int J Climatol* 34(2):518–528. <https://doi.org/10.1002/joc.3704>
- Zadoks JC and Schein RD (1979)** *Epidemiology and Plant Disease Management*. Oxford University Press, New York.
- Zhang BC, Cao JJ, Bai YF, Yan SJ, Hu L and Ning ZG (2011)** Effects of cloudiness on carbon dioxide exchange over an irrigated maize cropland in northwestern China, *Biogeosciences Discuss.*, 8, 1669–1691, <https://doi.org/10.5194/bgd-8-1669-2011>
- Zhang D, Li R, Batchelor WD, Ju H and Li Y (2018 b)** Evaluation of limited irrigation strategies to improve water use efficiency and wheat yield in the North China Plain. *PLOS ONE*, 13(1), e0189989. doi:10.1371/journal.pone.0189989
- Zhang D, Liu X and Hong H (2013)** Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Stoch Environ Res Risk Assess* 27:1871–1881. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0723-0>

- Zhang F, Wang C, Xie G, Kong W, Jin S, Hu J and Chen X (2018 a)** Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century, *Global Energy Interconnection* (1) 4: 443-451. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.004>.
- Zhang Y, Liu C, Tang Y and Yang Y (2007)** Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *J Geophys Res* 112(D12).<https://doi.org/10.1029/2006jd008161>
- Zhao Y, Li Z, Cai S and Wang H (2020)** Characteristics of extreme precipitation and runoff in the Xijiang River Basin at global warming of 1.5°C and 2°C. *Nat Hazards* 101:669–688. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03889-x>
- Zhao C, Li B, Piao S, Wang X, Lobelli DB et al. (2017)** Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 114 (35): 9326–9331 [doi/10.1073/pnas.1701762114](https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114)
- Zhen Z, Cai H, Wang Z and Wang X (2020)** Simulation of climate change impacts on phenology and production of winter wheat in North western China using CERES-wheat model. *Atmosphere-Basel* 11(7):681. <https://doi.org/10.3390/atmos11070681>
- Zhou TJ, Zhang LX and Li HM. (2008 a)** Changes in global land monsoon area and total rainfall accumulation over the last half century. *Geophysical Research Letters*, 35, L16707.
- Zittis G, Hadjinicolaou P and Lelieveld J (2014)** Role of soil moisture in the amplification of climate warming in the eastern Mediterranean and the Middle East. *Clim Res* 59(1):27–37. <https://doi.org/10.3354/cr01205>
- Zittis G, Hadjinicolaou P, Klangidou M et al. (2019)** A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Reg Environ Change* 19, 2621–2635. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>
- Zittis G, Hadjinicolaou P, Klangidou M et al. (2019)** A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Reg Environ Change* 19, 2621–2635 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>
- Zwart SJ, Bastiaanssen WGM, de Fraiture C and Molden DJ (2010)** A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat. *Agr Water Manage* 97(10):1617–1627. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.018>