وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie

جامعة فرحات عباس، سطيف 1
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département des Science Agronomiques

N°……/SNV/2026

THÈSE

Présentée par

Chetioui Chaima

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3ème CYCLE

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Production Végétale

THÈME

Modélisation de l'impact du changement climatique sur le blé en zone semi-aride

Soutenu publiquement le : 04/ 06/ 2026

DEVANT LE JURY

Président : M. Rouabhi Amar	MCA. Université Ferhat Abbas Sétif1
Directeur de thèse : M. Bouregaa Tarek	Pr . Université Ferhat Abbas Sétif1
Examinateur : M. Harrag Nasir	MCA. Université Ferhat Abbas Sétif1
Examinateur : M. Hadjeb Ayoub	Pr. Université Mohamed khider Biskra
Examinateur : M. Maamri Khelifa	MCA.Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À moi-même, pour ma persévérance, mon silence, et ma force tranquille

Merci à moi d'être restée debout jusqu'à cette étape

Chaima

Remerciement

Je remercie tout d'abord DIEU, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la capacité nécessaire, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail.

J'exprime mes respectueuses considérations et mes sincères remerciements à mon promoteur, Monsieur Tarek Bouregaa, pour sa patience, ses orientations et ses précieux conseils tout au long de cette étude.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes sincères remerciements vont à toute l'équipe de l'ITGC de Sétif pour leur contribution à la réalisation des essais de cette thèse et pour leurs conseils avisés.

Je remercie chaleureusement tous mes amis et collègues des sciences agronomiques pour leur soutien et leurs encouragements.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements à toutes celles et ceux qui œuvrent pour le bien de l'humanité et le progrès de la science.

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Table des matières

ملخص

Abstract

Résumé

Liste des abréviations

Liste des Tableaux

Les travaux dirigés dans le cadre de cette thèse

Introduction générale 1

Synthèse bibliographique 4

Chapitre 1 :Changement climatique observations actuelles et future projection . 5

1. Introduction 6

2. Notion de changement et de variabilité climatique 6

3. Les origines du changement climatique 6

3.1 Origines naturelles 6

3.1.1 Volcans 6

3.1.2 Les courants océaniques 7

3.1.3 Augmentation du niveau de la mer 7

3.1.4 La fonte des glaces 7

3.1.5 Changements à l'orbite de la Terre 8

3.1.6 L'intensité du Soleil 8

3.2 Origines anthropiques 9

3.2.1 Émissions de gaz à effet de serre 9

3.2.3 Exploitation de combustibles fossiles 10

3.2.4 Changements dans l'usage du sol **10**

3.2.5 Environnements de polluants **10**

3.2.6 Agricole développement **11**

3.2.7 Urbanisation **11**

4 Modélisation du climat et des scénarios futures **12**

4.1 Les modèles climatiques **12**

4.1.1 Les Modèles de Circulation Générale (MCG) **12**

4.1.2 Les modèles de circulation régionale (MCR) **13**

5 Les scénarios climatiques **14**

5.1 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) **14**

5.2 « RCP » : Voies de Concentration Représentatives (Voies de Concentration Représentative) **15**

5.3« SSP » et « SPA » : itinéraires socio-économiques communs (itinéraires socio-économiques partagés) et Hypothèse des politiques partagées **17**

5.3.2.2 SSP4.5 Inégalité - Une route divisée **19**

5.3.2.3 SSP 5.8 Développement à énergie fossile - Prendre le chemin de fer **20**

6 Les incertitudes des prévisions climatiques **22**

6.1 Méthodes de correction des données climatiques simulées **23**

Chapitre 2 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur la culture du blé **25**

1 Introduction **26**

2 Notion du Modèle **26**

3 Construction et validation du modèle **26**

4 Modèle de culture **27**

4.1 Définition **27**

4.2 Historique et Évolution du modèle de culture **27**

4.3 Construction et validation du modèle de culture **29**

4.4 Type du modèle de culture 29

4.4.1 Les modèles statistiques 30

4.4.2 Les modèles mécanistes 30

4.5 Application de la modélisation de la croissance des cultures 31

4.5.1 Prévision du rendement 31

4.5.3 Gestion de la culture 32

4.6 Impact des changements climatiques sur la production agricole 32

4.7 Impact du CO2 sur la culture du blé 34

4.8 Impact des aérosols sur la culture du blé 34

4.9 Impact des changements climatiques sur le cycle cultural 35

PARTIEII : Matériel et méthodes 38

1.Introduction 40

2 Position géographique 40

2.1 Les reliefs 40

2.1.1 Zone montagneuse 40

1.1.2 Zone des hautes plaines : 41

1.1.3 Zone de dépression sud : 41

2.2 Sol, topographie et géologie 41

2.3 Climat de la région 41

2.3.1 La sécheresse 41

2.3.2 Les gelées 42

2.3.3 Le vent 42

2.3.4 Précipitation 42

2.3.5 Température 43

3 Site et procédures expérimentales 43

1. Choix du modèle de culture 44

1.1 Aquacrop Model 45

1. 1.1 Description 45

1.1.2 Données d'entrées du modèle Aquacrop 46

1 .1.2.1 Données climatiques observé 46

1.1.2.2 Données du sol 46

1.1.2.3 Données culturales 48

1.2 Calibration du modèle Aquacrop 50

1.3 Validation du modèle Aquacrop 50

1.4 Évaluation du modèle 53

2.Données climatiques historiques et futures 54

3.Description des modèles climatiques 55

Chapitre I : Examen du climat récemment observé et des changements climatiques futurs prévisibles à Sétif 60

1 Introduction 61

2 A l'échelle annuelle 61

2.1 Précipitations 61

2.2.2 Température minimale 63

2.2.3 Température moyennes 63

2.3 Humidité relative 64

2.4 Vitesse du vent 65

2.5 Rayonnement solaire 66

2.6 Évapotranspiration de référence 67

2.7 Teneurs moyennes en CO_2 dans l'atmosphère terrestre 68

3 A l'échelle mensuelle 69

3.1 Précipitation 69

2.4 Vitesse de vent 75

2.5 Humidité relative 77

2.6 Rayonnement solaire 78

2.7 Évapotranspiration de référence 80

4 Discussion.....82

Chapitre II : Évaluation des impacts potentiels du changement climatique futur sur le rendement des cultures, la couverture végétale, la paille et la productivité en eau du blé dur et tendre pluviales dans les hautes plaines de Sétif 88

1 Introduction.....89

2 Modélisation de l'influence de CC Future sur la culture du blé.....89

2.1 Évaluation de l'efficacité du modèle AquaCrop à simuler les rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et l'humidité de sol.....89

2.3 Analyse de l'effet du changement climatique à venir sur la culture du blé dur et du blé tendre pluvial.....97

2.4 Estimations et prévisions des rendements, biomasse sèche, productivité de l'eau de blé dur et tendre dans les perspectives de changements climatiques futurs 98

2.5 Projections futures des rendements de blé dur et tendre 99

2.6 Projections futures de la biomasse sèche de blé dur et tendre.....100

2.7 Projections futures de la productivité de l'eau de blé dur et tendre 100

3 Discussion.....101

3.1 Effet du changement climatique futur sur le rendement du blé.....102

3.2 Effet du changement climatique futur sur la productivité de l'eau du blé...104

3.3 Effet du changement climatique futur sur la biomasse sèche du blé 105

3.4 Effet du changement climatique futur sur la durée du cycle de croissance du blé 107

3.5 Adaptation du blé au changement climatique futur par la sélection d'une date optimal pour le semis 108

4. Limites de l'étude.....109

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 111

Références bibliographiques :..... 116

ملخص

أجريت هذه الدراسة في المنطقة شبه الجافة لولاية " سطيف "خلال المواسم الزراعية الثلاثة 2021-2022، 2022-2023 و 2023-2024 من أجل الحفاظ و البحث عن طرق تأقلم إنتاج القمح الصلب واللين في ظل التحديات التي يطرحها تغير المناخ. أظهرت التوقعات المناخية للفترتين المستقبلية القريبة (2030) والمتوسطة (2050) تحت تأثير سيناريوهاتSSPs ، ارتفاع متوسط درجة الحرارة ليصل إلى 17.89° سنة 2030 و18.63° سنة 2050، بينما سينخفض معدل تساقط الأمطار السنوي من 288.824 ملم و270.758 ملم حتى 260.244 ملم للفترتين على التوالي. تمت محاكاة مختلف المؤشرات الإنتاجية باستخدام نموذج Aquacrop في أصناف القمح الصلب "الواد البارد" والقمح اللين "الوفاق"، وأظهرت دقة النموذج من خلال مؤشرات إحصائية بالنسبة لمردود القمح الصلبd=0.92 ، rmse = 0.34، r = 0.99، nrmse=22.1 ، والقمح اللينd=0.83 ، rmse=0.61، r = 0.94،nrmse=34.7 .وعند مقارنة نتائج متوسط إنتاج القمح للفترة المرجعية (1995-2014)، المقدرة بـ 6ق/هـ للقمح الصلب 7.4 ق/هـ للقمح اللين، وجد أن المحاكاة المستقبلية تشير إلى زيادات مهمة في جميع السيناريوهات. حيث بلغت مردودية القمح الصلب للفترة (2020-2039) ما بين 14.20 إلى 16.60 ق/هـ، وللفترة (2040-2059) ما بين 15.20 إلى 28.75 ق/هـ بحسب مستوى السيناريو المناخي، أما القمح اللين فقد تراوحت المردودية ما بين 9.5 إلى 14 ق/هـ للفترة الأولى، ومن 10.5 إلى 15.5 ق/هـ للفترة الثانية. من حيث الكتلة الحيوية، بالنسبة للقمح الصلب، بلغت القيم المرجعية 13.17 ق/هـ بينما ارتفعت قيم المحاكاة بين 31.52 إلى 36.83 ق/هـ للفترة الأولى، وبين 33.73 إلى 39.38 للفترة الثانية. وفي القمح اللين ارتفع المردود المرجعي من 14 ق/هـ إلى 18–28ق/هـ و20–29.86 ق/هـ في الفترتين على التوالي.وبخصوص إنتاجية المياه، ارتفعت القيم المرجعية من 0.15 كغ/م^3 لتصل إلى ما بين 0.39 و0.46 كغ/م^3 في القمح الصلب 0.16 و0.18 كغ/م^3 في القمح اللين للفترة (2020-2039)، أما للفترة (2040-2059) بلغت الإنتاجية 0.41–0.84 كغ/م^3 للقمح الصلب و0.22–0.53 كغ/م^3 للقمح اللين.في التحليل النهائي، فسرت الدراسة هذه النتائج بتحسن محصول القمح الصلب واللين وارتفاع إنتاجية المياه والكتلة الحيوية، وذلك لزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الجو الذي يحفّز عملية التركيب الضوئي، مع توقع مجموعة آثار أخرى مثل تقليص مدة النمو بفعل ارتفاع درجات الحرارة ودعم الزرع المبكر إثر انخفاض الأمطار، ما يجعل هذه الإجراءات استراتيجية فعالة لاستدامة الإنتاج الزراعي أمام تغير المناخ.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، القمح اللين، منطقة شبه جافة، سيناريوهات SSP_s، تغير المناخ.

Abstract

This study was conducted in a semi-arid region of Setif province over three consecutive cropping seasons (2021-2024) to investigate adaptation strategies for the production of durum and soft wheat under the challenges of climate change. Climate forecasts for the short-term (2030) and medium-term (2050), across all SSP scenarios, predict an increase in average temperature (reaching 17.89°C and 18.63°C in 2030 and 2050 respectively) and a decrease in annual rainfall amounts (down to 288.824 mm, 270.758 mm, and 260.244 mm for the corresponding periods). The Aquacrop model was employed to simulate yield, biomass, soil moisture, and vegetation cover for two wheat species durum wheat (Oued el Bared) and soft wheat (El Wifaq) under three SSP scenarios for the future horizons (2020-2039) and (2040-2059). Model accuracy was evaluated using statistical indicators (NRMSE, RMSE, D ,r), with values for durum wheat yield as follows: d=0.92, rmse=0.34, nrmse=22.1;r=0.99, and for soft wheat: d=0.83, rmse=0.61, nrmse=34.7,r=0.94 confirming strong reliability of the simulations. Compared to the reference period (1995-2014) where average yields were 6 q/ha for durum wheat and 7.4 q/ha for soft wheat, future projections show marked increases: durum wheat yields range from 14.20 to 16.60 q/ha (2020-2039) and 15.20 to 28.75 q/ha (2040-2059); soft wheat yields range from 9.5 to 14 q/ha (2020-2039) and 10.5 to 15.5 q/ha (2040-2059), depending on the scenario. Durum wheat dry biomass increases from 13.17 q/ha (reference) to 31.52–36.83 q/ha (2020-2039) and 33.73–39.38 q/ha (2040-2059); soft wheat dry biomass rises from 14 q/ha to 18–28 q/ha and 20–28.86 q/ha for the same periods. Water productivity also improves from 0.15 kg/m³ (reference) to 0.39–0.46 kg/m³ for durum wheat and 0.16–0.18 kg/m³ for soft wheat over 2020-2039; and for 2040-2059, it reaches 0.41–0.84 kg/m³ (durum) and 0.22–0.53 kg/m³ (soft). These findings indicate that increased atmospheric CO_2 enhances photosynthesis, reduced evaporation and early sowing supported by decreased precipitation favor yield and water use efficiency, although growing periods are shortened by rising temperatures. Thus, these strategies offer promising avenues for sustaining agricultural production in semi-arid regions under climate change.

Key-words: Durum wheat, Soft wheat, Semi-arid zone, SSP scenarios, Climate change.

Résumé

Cette étude a été réalisée dans une région semi-aride de la wilaya de Sétif durant trois saisons agricoles consécutives (2021-2024), dans le but d'explorer des stratégies d'adaptation pour la production de blé dur et de blé tendre face aux défis du changement climatique. Les projections climatiques à court terme (2030) et à moyen terme (2050), selon tous les scénarios SSP, indiquent une augmentation de la température moyenne (atteignant 17,89°C puis 18,63°C en 2030 et 2050 respectivement) et une baisse des précipitations annuelles (de 288,824 mm en 1995-2014 à 270,758 mm et 260,244 mm respectivement). Le modèle Aquacrop a été utilisé afin de simuler le rendement, la biomasse, l'humidité du sol et la couverture végétale pour deux espèces : le blé dur « Oued el Bared » et le blé tendre « El Wifaq », sous l'effet des trois scénarios SSP pour les horizons 2020-2039 et 2040-2059. La performance du modèle a été évaluée à l'aide des indices statistiques (NRMSE, RMSE, D ,R), révélant pour le blé dur d=0,92, rmse=0,34, nrmse=22,1, r=0.99 et pour le blé tendre d=0,83, rmse=0,61, nrmse=34,7, r=0.94 ce qui témoigne d'une bonne fidélité des simulations. Par rapport à la période de référence (1995-2014), où les rendements étaient de 6 q/ha pour le blé dur et 7.4 q/ha pour le blé tendre, les projections futures présagent des augmentations notables : pour le blé dur, 14,20 à 16,60 q/ha (2020-2039) et 15,20 à 28,75 q/ha (2040-2059) ; pour le blé tendre, 9.5 à 14 q/ha (2020-2039) et 10.5 à 15.5 q/ha (2040-2059). La biomasse séche du blé dur passe de 13,17 q/ha (référence) à 31,52–36,83 q/ha (2020-2039) puis 33,73–39,38 q/ha (2040-2059), tandis que celle du blé tendre s'accroît de 14 q/ha à 18–28 q/ha puis 20–29,86 q/ha selon les périodes. La productivité de l'eau s'améliore également de 0,15 kg/m³ (référence) à 0,39–0,46 kg/m³ pour le blé dur et 0,16–0,18 kg/m³ pour le blé tendre sur 2020-2039 ; sur 2040-2059, elle atteint 0,41–0,84 kg/m³ (blé dur) et 0,22–0,53 kg/m³ (blé tendre). Ces résultats démontrent que l'élévation du CO_2 atmosphérique stimule la photosynthèse, tandis que la réduction de l'évaporation et le semis précoce, permis par la diminution des précipitations, favorisent le rendement et l'efficience de l'utilisation de l'eau, bien que la période de croissance soit écourtée par la hausse des températures. Ces stratégies émergent ainsi comme des pistes prometteuses pour assurer la durabilité de la production agricole en régions semi-arides, même sous l'effet du changement climatiques.

Mots clés : Blé dur, Blé tendre, Zone semi-aride, Scénarios SSPs, Changement climatique.

Liste des abréviations :

C1 : SSP 1.9 (2020-2039)

C2 : SSP 4.5 (2020-2039)

C3 : SSPP 8.5 (2020-2039)

D1 : SSP 1.9 (2040-2059)

D2 : SSP 4.5 (2040-2059)

D3 : SSP 8.5 (2040-2059)

B : Biomasse

BBA : Borj Bou Arreridj

BD : Blé Dur

BT : Blé Tendre

BWH : Climat Désertique chaud Aride

C° : Degrés Celsius

CAMS-CSM1-0 : Modèle de l'Académie Chinoise des Sciences Météorologiques - Modèle de Système Couplé version 1.0

CanESM5 : Modèle canadien du système terrestre version 5 (Canada)

CC : Changement Climatique

CC0 : Canopée initiale de jeune plan à 90% de levée

CCx : Canopée Végétale Maximale

CFCs : Chlorofluorocarbones

CH4 : Méthane

CMIP6 : Projet d'intercomparaison des modèles couplés, 6^{e} Phase

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

CNRM-ESM2-1 : Modèle du Centre National de Recherches Météorologiques – Earth System Model version 2.1 (France)

CO2 : Dioxyde Carbone

COS : carbone organique du sol

CRU : Unité de Recherche Climatique

CWR : Besoin en Eau de la Culture

d : l'indice d'accord de Willmot

DHC : Déficit Hydrique Agricole

DSSAT: Décision Support System for Agrotechnology Transfer

EC-Earth3-VEG : Modèle européen Earth System version3 avec Dynamique de la végétation

EF : Déficience Nash-Sutcliffe

ENSO : El Nino-Southern Oscillation

EPA : Agence de Protection de l'Environnement

Eto : Evapotranspiration de références

ETTCCDL: Ensemble des Tendances Temporelles des Changements Climatiques et de Développement Limité

FAO : Food and Agriculture Organization

FC : Field Capacity

FGOALS-G3: Flexible Global Ocean-Atmosphere- Land System Model-Grid-point version3(Chine)

GCM : Modèle climatique globale

GES : Gaz à Effet de Serre

GFDL-ESM4 : Laboratoire de Dynamique des Fluides Géophysiques – Modèle du Système Terrestre version 4 (États-Unis)

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

Ha : Hectare

Hab : Habitant

HAI : Hauteur Agricole d'Indice

HCFC : Hydrochlorofluorocarbones

HFC : Hydrofluorocarbures

HI : Indice de Récolte

IAASTD : Evaluation Internationale des Connaissances, des Sciences et des Technologies Agricoles pour le Développement

IAMs : Modèles intégrés d'évaluation

IPCC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IPSL-CM6A-LR : Modèle de l'institut Pierre Simon Laplace – Modèle climatique version 6A à basse résolution (France)

ISH : l'Indice de Stress Hydrique

ITGC : Institut Technique des grandes cultures

Km : Kilomètre

LAD : Durée de surface foliaire verte

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique

m : Mètre

m^2 : Mètre carré

m^3 : Mètre cube

MCR : Modèle de Circulation Régionale

MIROC6 : Modèle climatique globale utilisé pour les projections futures dans le cadre du **CMIP6** : Projet d'Intercomparison des Modèles Couplés (phase6)

Mj/m^2 : Méga Joule par mètre carré

mm : Millimètre

MoA : Ministère de l'Agriculture

MRI-ESM2-0 : Institut de recherche météorologique - Modèle du système terrestre version 2.0 (Japon)

N2O : Oxyde Nitreux

NAO+ : la phase positive de l'oscillation Nord-Atlantique

NOAA : Administration Nationale Océanique et Atmosphérique

NRC : Conseil National de Recherches

NRMSE : Erreur Quadratique Moyenne Normalisée

OMM : Organisation, Météorologique mondiale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONM : Office National de la Météorologie

ONU : Organisation des Nations Unies

P : Précipitation

PCC : Précipitation durant le cycle de croissance de blé

PFC : Perfluorocarbone

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PR : Periode de référence

PPM : parties par million

PWP : Point de Flétrissement Permanent

qx : Quintaux

R : Coefficient de corrélation

RCP : Trajectoires Représentatives de Concentration

RDT: Rendement

RMSE: Root Mean Square Error

Rn : rayonnement solaire

RnCC : Rayonnement net solaire incident durant le cycle de croissance de blé

RUE : Efficacité d’utilisation du rayonnement

S : Durée d'ensoleillement

s : Seconde

SF6 : Sulfuré Hexafluorure

SPA : Hypothèse des politiques partagées

SPI : Indice de Précipitations Standardisé

SRES : Rapport Spécial sur les scénarios d’émissions

SSPs : Trajectoires Socio-économiques Partagées

SWC : Humidité de Sol

TCC : Températures moyennes durant le cycle de croissance de blé

Tmax : Température maximale

Tmin : Température minimale

UNICEF : Fonds des Nations Unies pour l’enfance

USGCRP : Programme de recherche sur les changements globaux des Etat –Unis

V : Vent

W/m² : Watt par mètre carré

WP : Productivité de L’eau

WUE : l'efficacité de l'utilisation de l'eau

Liste des Tableaux

Tableau 1	Les paramètres physico-chimique de site expérimentale (ITGC).	**47**
Tableau 2	Valeurs des paramètres conservatifs et non conservatifs (calibrés et observés) du blé tendre sur Aquacrop.	**51**
Tableau 3	Valeurs des paramètres conservatifs et non conservatifs (calibrés et observés) du blé dur sur Aquacrop.	**52**
Tableau 4	Modèles de circulation générale utilisés pour les scénarios SSPs (O'Neill et al., 2017).	**56**
Tableau 5	Performance du modèle Aquacrop dans la simulation des rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et la teneur de l'humidité du sol du cultivar de blé dur « Oued el Bared » observés et simulés au cours des trois saisons agricoles : 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024.	**93**
Tableau 6	Performance du modèle Aquacrop dans la simulation des rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et la teneur de l'humidité du sol du cultivar de blé tendre « El Wifek », observés et simulés durant les trois saisons agricoles : 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024.	**94**
Tableau 7	Comparaison des moyennes interannuelles de TCC, PCC, Rn CC entre le PR et les scénarios à venir : SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5.	**97**

Liste des Figures

Figure 1	Considération du GCM et du RCM (Source : Zadafiya al., 2022).	**09**
Figure 2	Les quatre familles de scénarios SRES (Source : GIEC, 2000).	**13**
Figure 3	Les quatre RCP, le développement du forçage radiatif et sa confrontation aux SRES.	**15**
Figure 4	Dans un contexte socio-économique spécifique, une appréciation « en matrice » des dépenses liées aux diverses politiques d'atténuation, d'adaptation et aux impacts postérieurs (Source : Arnell et al., 2011).	**17**
Figure 5	Dans un contexte socio-économique spécifique, une appréciation « en matrice » des dépenses liées aux diverses politiques d'atténuation, d'adaptation et aux impacts postérieurs (Source : Arnell et al., 2011).	**19**
Figure 6	Étendue des défis socio-économiques pour la réduction et l'adaptation (O'Neill et al., 2014).	**23**
Figure 7	Climatologie mensuelle des températures minimales, maximales, moyenne des températures et précipitations dans la zone de Sétif entre 1991 et 2020 (CCKP 2023).	**43**
Figure 8	Situation géographique de la zone d'étude.	**44**
Figure 9	Mesure de l'humidité du sol à l'aide d'une tarière et séchage dans l'étuve à température de 105°C.	**47**
Figure 10	Mesure de la biomasse dans une superficie de ¼ m² et séchage dans l'étuve à température à 105°C.	**48**
Figure 11	Le taux de couverture de la canopée (CC) en utilisant l'application Canopeo.	**49**

Figure 12 Méthodologie de prévision des rendements, biomasse, couverture de la canopée du blé et productivité en eau avec le logiciel Aquacrop. **58**

Figure 13 Comparaison des précipitations entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2050. **61**

Figure 14 Comparaison des températures maximales entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **62**

Figure 15 Comparaison des températures minimales entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **63**

Figure 16 Comparaison des températures moyennes entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **64**

Figure 17 Comparaison de l'humidité relative (%) entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2050. **65**

Figure 18 Comparaison des vitesses moyennes du vent entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **66**

Figure 19 Comparaison des rayonnements solaires entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **67**

Figure 20 Évaluations des paramètres climatiques de l'évapotranspiration de référence de la période de référence (1995-2014). **68**

Figure 21 Comparaison de l'évapotranspiration de référence entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050. **68**

Figure 22	Comparaison des moyennes des concentrations de [CO2] entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050.	**69**
Figure 23	Comparaison des précipitations entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050.	**70**
Figure 24	Comparaison des températures moyennes mensuelles entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050.	**72**
Figure 25	Comparaison des températures maximales mensuelles entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050.	**73**
Figure 26	Comparaison de la température minimale mensuelle entre la période de référence et les scénarios SSPs projetés en 2030 et 2050.	**75**
Figure 27	Comparaison des moyennes de la vitesse du vent (m/s) entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050.	**77**
Figure 28	Comparaison des moyennes mensuelles de l'humidité relative entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050.	**78**
Figure 29	Comparaison des moyennes mensuelles de rayonnement solaire entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050.	**80**
Figure 30	Comparaison des moyennes mensuelles de l'évapotranspiration entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050.	**82**
Figure 31	La moyenne des rendements observés et simulés de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2024).	**90**

Figure 32 La moyenne de biomasse aérienne sèche observée et simulée de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024). **91**

Figure 33 La moyenne de la teneur en eau du sol observée et simulée de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024). **91**

Figure 34 La moyenne de couverture végétale observée et simulée de la culture du BD « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024). **92**

Figure 35 Comparaison des moyennes de biomasse sèche du blé tendre et dur (1995-2014) entre les scénarios PR et SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 pour les projections futures (2030-2050). **98**

Figure 36 Comparaison des moyennes du rendement du blé tendre et dur (1995-2014) entre les scénarios PR et SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 pour les projections futures (2030-2050). **98**

Figure 37 Comparaison des moyennes de productivité de l'eau du blé tendre et dur (1995-2014) entre les scénarios PR et SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 pour les projections futures (2030-2050). **99**

Travaux dirigés dans le cadre de cette thèse

- **Chetioui, C., Bouregaa, T. Prevision of biomass, yield and water productivity for soft and durum wheat in Setif region using Aquacrop under SSPscenarios. https://doi.org/10.5281/zenodo.17699006.**
- **Chetioui, C., Bouregaa, T. Temperature and precipitation projections from CMIP6 for the Setif high plains in Northeast Algeria. *Arab J Geosci* 17, 63 (2024). https://doi.org/10.1007/s12517-024-11854-2.**

Introduction générale

Introduction générale

D'après les projections, environ 670 millions d'individus devraient continuer de souffrir de sous-alimentation en 2030, ce qui représente 8% de la population mondiale totale. Par rapport à 2015, année d'instauration du Programme de développement durable à l'horizon 2030 (Oms et Unicef, 2022). Le blé *(Triticum durum)*, dont la production substantielle s'est élevée à 808 millions de tonnes en 2022, avec un rendement moyen de 30 quintaux par hectare (Faostat, 2024). En 2022, une production inférieure à trois millions de tonnes, conjuguée à un rendement de seize quintaux par hectare, a entraîné une diminution de l'approvisionnement en blé en Algérie, stimulant par conséquent les importations (Faostat, 2024). Durant la période allant de 2016 à 2019, les importations de blé ont connu une augmentation continue en termes de quantité et de valeur, atteignant une moyenne de huit millions de tonnes. Ceci compromet la sécurité alimentaire du pays relative au blé, en dépit des efforts déployés par le gouvernement algérien pour maintenir les prix intérieurs de la production. (Bekkis et al., 2022). Les projections pour l'année 2040 mettent en évidence des difficultés considérables pour le secteur du blé en Algérie, notamment une aptitude diminuée à répondre à la demande intérieure en blé dur, une cessation totale de la production locale de blé tendre, ainsi qu'une dépendance accrue vis-à-vis des importations de blé. Les implications de la politique publique sont déduites en fonction de la sécurité alimentaire *(*Bekkis*,* 2023).

Dans ce contexte, il est à noter que le changement climatique impacte l'ensemble des domaines à l'échelle mondiale. Au sein de ces régions, l'Algérie est confrontée à des épisodes de chaleur intense et à des sécheresses d'une sévérité croissante. Il est attendu que ces conséquences s'intensifient au cours des prochaines décennies. Les variations climatiques exercent une influence substantielle sur la culture des céréales, les fluctuations thermiques et les modifications du régime des précipitations induisant une diminution significative des rendements (Guechgal, 2021). L'Afrique est confrontée à un défi majeur, marqué par des projections d'élévations significatives de température qui excèdent la moyenne mondiale, en particulier dans les régions arides (Niang et al., 2014). Les zones littorales de la Méditerranée, caractérisées par des températures annuelles moyennes se situant entre 18 et 20 °C, anticipent une augmentation continue des températures (Isinkaralar et al., 2023). D'après les études, l'Afrique du Nord, incluant l'Algérie et les pays limitrophes, devrait connaître

d'importante augmentation de température au cours du XXIe siècle (Bucchignani et al., 2018). La région méditerranéenne, reconnue pour ses saisons singulières, est confrontée à des mutations climatiques notables, qui se manifestent par des altérations soutenues de la température et des précipitations, conformément aux recherches antérieures et aux simulations issues des modèles de circulation générale (MCG) (Ventrella et al., 2012). Les modèles de circulation générale (MCG) fournissent des simulations climatiques globales indispensables pour le suivi et la prévision des évolutions à long terme des éléments climatiques (Haji-Aghajany et al., 2022). Les scénarios socio-économiques partagés (SSP), récemment élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), permettent de prévoir les évolutions climatiques futures. En réalité, les modèles de croissance ont acquis une importance prépondérante dans le domaine de la production végétale afin d'examiner les relations complexes entre le sol, la plante et le climat (Zhao et al., 2015 ; Wang et al., 2019). En règle générale, Aquacrop constitue un outil fiable et efficace pour la simulation du couvert végétal (CC) et de l'évapotranspiration (ET) sur une base quotidienne, tout en assurant une simulation précise des composantes biomasse et rendement des grains à la fin de la période de croissance des semences (Mousavizadeh et al., 2016).

L'objectif de cette étude est de prédire l'évolution des paramètres climatiques dans la région étudiée, en s'appuyant sur les modèles de circulation générale (MCG) selon divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP et SSP). Cette prédiction s'effectuera à court, moyen et long terme. Il s'agira également d'évaluer l'impact de l'évolution de ces paramètres sur le blé (rendement, biomasse, besoins en eau, etc.) au moyen de modèles de culture. Dans le but de permettre aux agriculteurs d'anticiper et de modifier leurs pratiques culturales, d'une part. En outre, il convient d'assister les décideurs dans leurs processus décisionnels et de définir une stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques.

Cette étude est divisée en trois grandes parties :

Partie bibliographique : Cette première partie est articulée autour de deux chapitres principaux

Chapitre 1 : Changements climatiques – observations actuelles et projections futures.

Chapitre 2 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur la culture du blé (dur et tendre).

Deuxième partie « matériel et méthode » : Utilisation de diverses méthodes et approches pour simuler et examiner la progression des séries climatiques actuelles et futures, ainsi que le comportement du blé (dur et tendre) vis-à-vis de ces aléas climatiques.

Troisième partie « Résultat et discussion » : est consacrée à présenter les principales découvertes de cette enquête et à les mettre en parallèle avec celles d'autres recherches similaires menées à travers le monde.

L'ensemble de ces parties constitue une approche cohérente permettant de comprendre, d'analyser et d'évaluer l'impact du changement climatique sur la culture du blé dans la région d'étude.

Synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Changement climatique observations actuelles et future projection

1. Introduction

La signification du terme « climat » diffère selon l'échelle d'analyse, qu'elle soit régionale ou globale. Le climat global se définit principalement par un ensemble restreint de paramètres météorologiques. L'environnement local est intrinsèquement corrélé au climat régional, par le biais de facteurs tels que le relief, l'hydrographie et l'écosystème, qui sont constitutifs d'un environnement spécifique (Poitou et Braconnot, 2020).

2. Notion de changement et de variabilité climatique

Le changement climatique constitue un phénomène global dont l'origine est attribuable aux activités anthropiques. Il est primordial d'établir une distinction claire entre les variations climatiques interannuelles, dont certaines présentent un caractère cyclique, à l'instar d'El Niño, et dont l'amplitude est corrélée à la sécheresse qui affecte les climats arides, semi-arides et subhumides. L'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone (CO2), du méthane (CH4) et de l'oxyde nitreux (N2O), est imputable au réchauffement climatique. Ces modifications induisent une altération de la circulation globale des masses d'air et des courants océaniques, entraînant par conséquent des perturbations au niveau des températures des vents, de l'humidité de l'air et des précipitations (Hiernaux et al., 2024). En revanche, il convient de noter que tout changement climatique d'origine anthropique sera contrebalancé par des fluctuations climatiques naturelles se manifestant sur des échelles temporelles et spatiales considérables (GIEC, 2014a).

3. Les origines du changement climatique

3.1 Origines naturelles

3.1.1 Volcans

L'effet prédominant des éruptions volcaniques sur le climat se manifeste par un réchauffement transitoire. La radiation solaire est atténuée par les particules de poussière et les nuages de cendres émis lors d'éruptions volcaniques. Compte tenu de la masse relative des particules de cendres, leur sédimentation au sol s’effectue en approximativement trois mois. Par conséquent, leur effet de refroidissement s'avère relativement transitoire. Néanmoins, il est à noter que le dioxyde de soufre se trouve aussi dans les résidus volcaniques. Ce gaz interagit avec la vapeur d'eau et les particules

atmosphériques, générant ainsi des aérosols de sulfate qui réfléchissent le rayonnement solaire depuis une altitude significativement inférieure à la surface terrestre. Ces aérosols peuvent persister dans l'atmosphère pendant une période d'un an ou plus et présentent une densité inférieure à celle des particules de cendre. Ces aérosols exercent un effet atténuateur sur le réchauffement induit par les éruptions volcaniques, à titre d'illustration, l'éruption du Mont Pinatubo en 1991 a occasionné une diminution d'environ 0,5°C de la température globale (NOAA, 2020).

3.1.2 Les courants océaniques

Depuis les années 1950, les géologues et les océanographes ont accumulé des données probantes relatives à l'évolution de la circulation océanique, un facteur déterminant du changement climatique (Cunningham, 2005 ; Tierney et al., 2013). Un courant océanique correspond à un déplacement continu et orienté de l'eau de mer, induit par diverses forces s'exerçant sur celle-ci, telles que le vent, les processus de déferlement et les variations de température et de salinité (England et al., 2014). La circulation des courants marins exerce une influence prépondérante sur la régulation du climat global et assure le maintien de la production primaire ainsi que des écosystèmes marins (Duteil et al., 2014). Les données probantes issues du Groenland indiquent que des variations abruptes de l'intensité de la circulation océanique ont induit des fluctuations thermiques considérables au cours de la dernière période glaciaire (Jayne, et Marotzke, 2001 ; Fischer et Knutti, 2015).

3.1.3 Augmentation du niveau de la mer

Il est attendu, à moyen terme, une élévation du niveau marin consécutive à la dilatation thermique des océans ainsi qu'à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires (Peterson et al., 2013). Les principales causes de l'élévation du niveau marin sont l'expansion thermique et la perte de glace en contact avec le sol. La dilatation thermique résulte de l'échauffement des océans, étant donné que le volume de l'eau s'accroît avec l'augmentation de sa température, ce qui implique que les eaux océaniques plus chaudes occupent un volume supérieur (You et Ringler, 2010 ; Hansen, 2016).

3.1.4 La fonte des glaces

Il est établi que les activités anthropiques exercent une influence sur le cycle hydrologique global depuis 1960, participant au retrait des glaciers depuis cette même

période et à l'augmentation de la superficie de la glace du Groenland depuis 1993 (Peterson *et al.,* 2013). Il a été établi qu'il contribuait à la réduction de la banquise atlantique depuis 1979 et qu'il participait de façon notable à l'augmentation du taux de chaleur global (0-700 mètres).

Une élévation moyenne du niveau marin global a été constatée depuis les années 1970 (You et Ringler, 2010 ; GIEC, 2014). Entre 1992 et 2011, une diminution de la masse des glaces du Groenland et de l'Antarctique a été observée. La régression des masses glaciaires s'est poursuivie à l'échelle quasi mondiale (You et Ringler, 2010). Il a été constaté une augmentation de la température atmosphérique et océanique, ainsi qu'une diminution des quantités de neige et de glace (GIEC, 2012). Il est attendu que la superficie des glaces continue de diminuer concomitamment à l'augmentation du taux de fonte, contribuant ainsi à l'élévation du niveau marin (Savage et al., 2015).

3.1.5 Changements à l'orbite de la Terre

D'après une étude de l'Université Rutgers (2018), le climat estival est influencé par divers facteurs relatifs à l'été en général, en fonction de la position spatiale de la Terre par rapport au Soleil. D'après William (2007), ces composantes incluent l'obliquité de l'étoile (l'angle de rotation axiale de l'étoile), l'excentricité de son orbite (le degré de circularité ou d'ellipticité de celle-ci) ainsi que sa position temporelle dans le cycle de précession des solstices et des équinoxes, impliquant des variations de distance entre l'étoile et le Soleil au cours des saisons et participant, par conséquent, aux modifications climatiques.

3.1.6 L'intensité du Soleil

Le climat subit l'influence de variations naturelles qui modifient la quantité d'énergie solaire atteignant la surface terrestre (EPA, 2010 ; IPCC, 2018). Les variations orbitales de la Lune sont susceptibles d'influer sur l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre. La quantité d'énergie thermique incidente en un lieu quelconque de la planète est directement corrélée à l'angle d'incidence du rayonnement solaire, lequel varie en fonction de la position géographique, de l'heure et de la saison, en raison de l'orbite terrestre autour du Soleil et de la rotation de la Terre autour de son axe incliné (Khavrus et Shelevytsky, 2010). Il a été avancé que les variations de l'énergie solaire pourraient affecter le climat terrestre, tant de manière directe, par la modification du taux d'échauffement de la planète, que de manière indirecte.

3.2 Origines anthropiques

3.2.1 Émissions de gaz à effet de serre

Il est à noter dans la (figure1) que, durant l'ère préindustrielle, l'augmentation de la température de l'air à la surface terrestre excédait d'environ le double l'augmentation de la température moyenne globale, en raison des émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2007a; GIEC, 2020). On observe une augmentation d'environ 0,6 °C des températures mondiales de surface depuis 1900. Il est hautement probable que l'ampleur de ce réchauffement excède celle observée pour toute autre période depuis l'année 2000, et que la décennie 1990 ait constitué la période la plus chaude du dernier millénaire. La propension au réchauffement se manifeste de manière hétérogène à l'échelle mondiale, toutefois, une augmentation a été observée dans la quasi-totalité des régions au cours des vingt-cinq dernières années (Yuksel, 2014 ; IPCC, 2018).

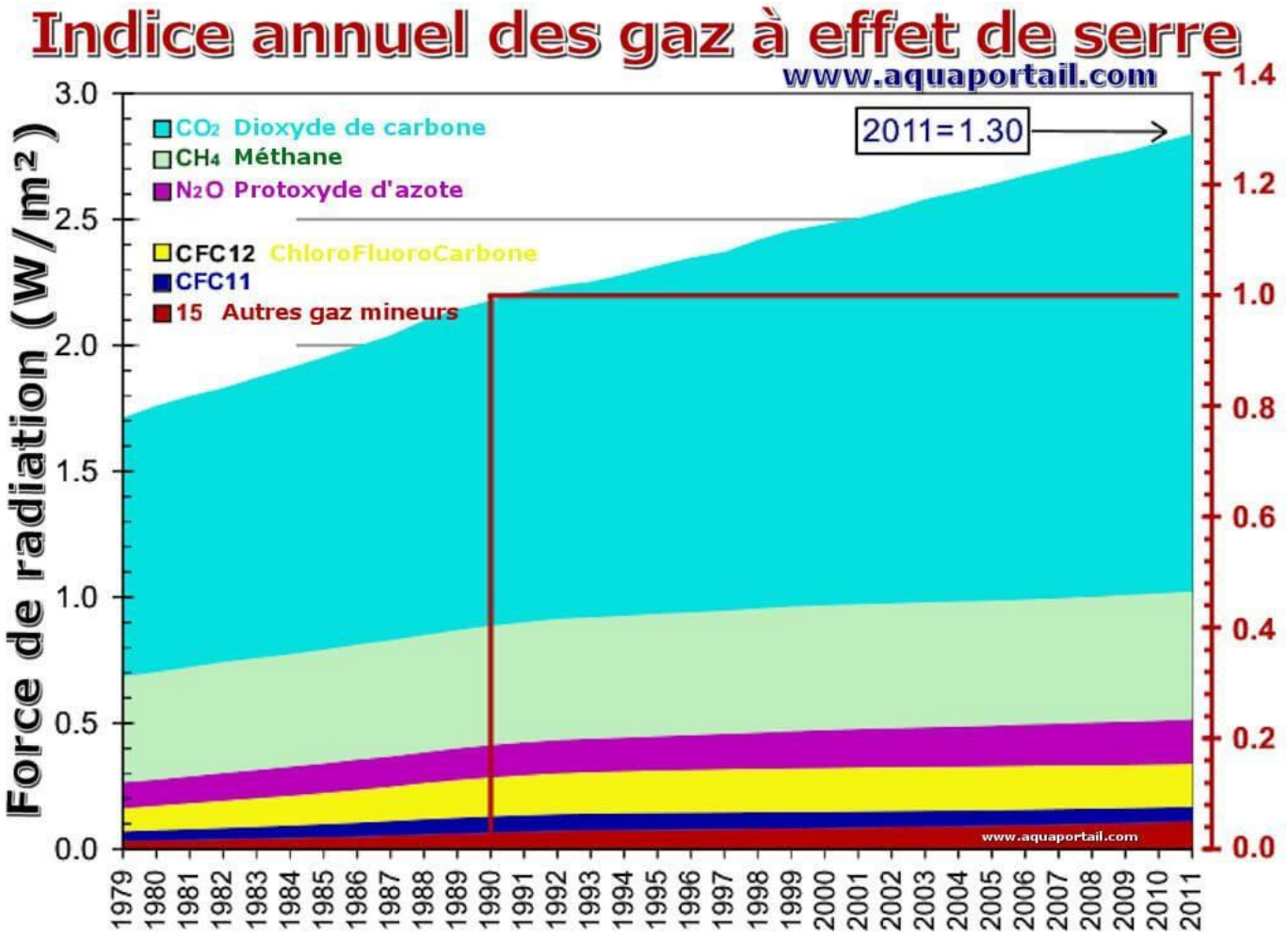


Figure 1 : indice annuel des gaz à effet de serre (Source : www.aquaportail.com)

3.2.3 Exploitation de combustibles fossiles

Il est à noter que le secteur agricole mondial consomme plus de trente pour cent de la demande énergétique finale mondiale, principalement satisfaite par des sources d'énergies fossiles, et qu'il est responsable de l'émission d'environ vingt-deux pour cent des gaz à effet de serre anthropiques (FAO, 2011a). D'après NRC (2011), l'augmentation de la température terrestre est imputable à l'ajout de gaz à effet de serre tels que le CO2, le N2O, le CH4 et la vapeur d'eau dans l'atmosphère, résultant principalement de la combustion d'énergies fossiles. L'augmentation de l'utilisation des combustibles fossiles induit une élévation du niveau de ces gaz dans l'atmosphère. La combustion de combustibles fossiles, tels que le coke, le pétrole et le gaz naturel, ainsi que la fabrication de ciment, contribuent à l'augmentation du niveau de dioxyde de carbone, ce qui réduit d'autant l'absorption de ce dernier par les arbres. L'accroissement de la concentration du CO2 constitue le principal facteur contribuant au réchauffement planétaire (GIEC, 2018).

3.2.4 Changements dans l'usage du sol

L'intensification de l'exploitation des sols et le changement climatique ont concouru à la désertification et à la dégradation des sols (GIEC, 2020). Les modifications des modes d'exploitation des sols par les individus, notamment pour la sylviculture, l'agriculture ou l'urbanisation, peuvent induire des effets thermiques locaux, tant positifs que négatifs, en modifiant l'albédo des surfaces continentales (c'est-à-dire, en influant sur la quantité de rayonnement solaire renvoyée dans l'espace) et l'hygrométrie d'une région (Adnan et al., 2011; David, 2018). La gestion inappropriée et l'exploitation des terres ont induit des répercussions économiques défavorables, exacerbées par les changements climatiques (GIEC, 2020).

3.2.5 Environnements de polluants

D'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2020), certains processus industriels et agricoles libèrent des polluants, distincts des gaz à effet de serre, qui sont à l'origine de la formation d'aérosols, définis comme de fines particules ou des particules en suspension dans l'atmosphère. En fonction de leur nature et de leur répartition géographique, certains aérosols exercent également une influence sur la formation des nuages, laquelle peut engendrer un effet de réchauffement ; la production de particules de carbone noir ou de sable lors de la

combustion de matières fossiles ou de végétation induit généralement un effet de réchauffement par l'absorption de l'énergie solaire incidente (USGCRP, 2009). Les chlorofluorocarbones (CFC), les hydro chlorofluorocarbones (HCFC), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbones (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF6), désignés collectivement sous le terme de gaz fluorés, sont fréquemment utilisés dans les systèmes de réfrigération, les agents d'expansion, les extincteurs d'incendie, les solvants, les pesticides et les propulseurs d'aérosols (IPCC, 2013).

3.2.6 Agricole développement

Les activités agricoles, notamment l'utilisation d'engrais à base de nitrates, accroissent les concentrations de protoxyde d'azote (N2O) dans l'atmosphère, contribuant ainsi aux changements climatiques (Moa, 2011). De façon analogue, il est établi que les activités anthropiques, notamment l'élevage, la riziculture, le remplissage des décharges et l'exploitation du gaz naturel, contribuent de manière prépondérante à l'augmentation des concentrations de méthane (CH4), lequel joue un rôle significatif dans l'évolution du climat. Il est dégagé par décomposition dans les milieux marécageux, à partir des ruminants, en particulier des bovins, et par émission de gaz fossile lors de l'extraction (Braman et al., 2010). Il a été constaté que l'activité anthropique a induit une élévation des concentrations de CH_4 au cours du XX^{e} siècle, celles-ci excédant désormais le double du niveau préindustriel (EPA, 2010). En outre, les halocarbures, notamment les chlorofluorocarbones (CFC), substances chimiques utilisées comme réfrigérants et retardateurs de flamme, peuvent agir comme agents de modification du climat et potentiellement détériorer la couche d'ozone.

L'expansion des surfaces cultivées induit une réduction plus importante de la biodiversité (MoA, 2011 ; IPCC, 2020).

3.2.7 Urbanisation

L'urbanisation est appréhendée comme un catalyseur de l'économie, favorisant la mobilité de la main-d'œuvre excédentaire du secteur agricole rural vers le secteur industriel urbain et participant ainsi à l'évolution économique (Muntasir et Syed, 2018). Cependant, une urbanisation dépourvue de planification adéquate peut engendrer des répercussions préjudiciables, affectant défavorablement l'économie, la déforestation, la dégradation environnementale et contribuant au réchauffement planétaire ainsi qu'au changement climatique (Zhang et al., 2017). L'expansion urbaine est susceptible de

contribuer à l'augmentation de la température dans les zones urbaines et périurbaines, phénomène connu sous le nom d'« îlot de chaleur urbain », particulièrement lors d'épisodes de chaleur intense, tels que les vagues de chaleur. L'expansion de l'urbanisation est susceptible d'exacerber les épisodes de fortes précipitations au sein des zones urbaines, ainsi que le dégel de ces mêmes zones. Ceci est susceptible d'entraîner des risques supplémentaires pour le système de drainage (IPCC, 2020).

4 Modélisation du climat et des scénarios futures

4.1 Les modèles climatiques

Au cours de la décennie 1970, une intégration progressive s'opère entre les approches de modélisation climatique et météorologique. Cette période marque une transition majeure : les systèmes de prévision opérationnelle, initialement conçus pour des échelles régionales puis étendus à l'échelle hémisphérique, acquièrent une dimension planétaire. Cette évolution technologique permet désormais la simulation de la dynamique atmosphérique à l'échelle du globe terrestre (Dalmedico et Guillemot, 2006).

4.1.1 Les Modèles de Circulation Générale (MCG)

Les modèles de circulation générale (MCG) constituent l'outil principal pour appréhender les évolutions climatiques passées et à venir (Frame et Stone 2013; Knutti et Sedláček 2013). D'après Zadafiya et al. (2022), cet outil représente la solution la plus perfectionnée actuellement accessible pour la simulation du système climatique mondial et de sa réponse aux forçages naturels. Un modèle de circulation générale (MCG) est constitué d'une multitude de cellules de grille représentant les zones horizontales et verticales de la surface terrestre. Les modèles de circulation générale (MCG) sont employés pour la prévision météorologique, la compréhension du climat et la projection des évolutions climatiques (Shukla et al., 2015; Mo et al., 2017; Goodarzi et al., 2021). Ainsi qu'il est illustré dans le schéma ci-dessous (figure 2), une compréhension plus approfondie des Modèles de Circulation Générale (MCG) et des Modèles Climatiques Régionaux (MCR) peut être obtenue. La résolution spatiale des modèles de circulation générale (MCG) est insuffisante pour appréhender les spécificités locales de la topographie et se trouve limitée par le modèle informatique (Arora et al., 2016 ; Jafarzadeh et al., 2021). Il s'avère indispensable de configurer les processus physiques de sous-maille. La paramétrisation constitue une méthode visant à

caractériser l'influence globale des processus se déroulant à une échelle inférieure à la résolution de la grille sur une échelle supérieure (Kavya Shree, 2016). Deux termes, notamment « prédictifs », sont principalement employés lors de la collecte de données issues de modèles de circulation générale (MCG) (Goodarzi et al., 2021).

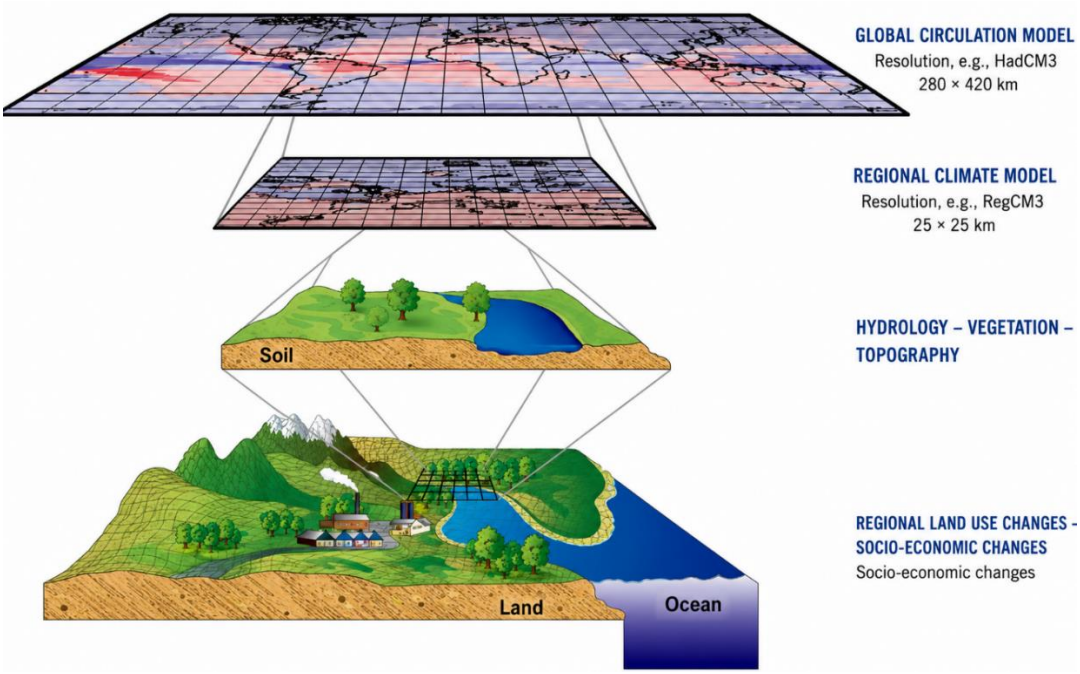


Figure 2 : Considération du GCM et du RCM (Source : Zadafiya et al., 2022)

4.1.2 Les modèles de circulation régionale (MCR)

L'intégration dynamique des modèles climatiques généraux (MCG) par le biais de l'utilisation de modèles climatiques régionaux (MCR) induit des prédictions climatiques de changement climatique plus fiables et à haute résolution (Paeth et al., 2008 ; Philip-pon et al., 2009). Plusieurs programmes internationaux, incluant de nombreux centres de recherche, ont entrepris d'élaborer des situations de coopération par le biais de réunions coordonnées, en exploitant divers modèles climatiques régionaux (MCR) tels qu'ENSEMBLE-AMMA (van der Linden et Mitchell, 2009) et PRUDENCE (Christensen et al., 2007), entre autres. Dans les années quatre-vingt, une approche complémentaire a été développée afin d'améliorer la qualité des données

climatiques simulées d'une région, en perfectionnant la résolution dans un modèle ne couvrant qu'une portion de la surface terrestre.

4.1.3 Downscaling méthodes

La réduction d'échelle est une méthode employée pour extraire des données à haute résolution à partir de données à basse résolution (Sarkar et al., 2015). Cette méthodologie s'appuie sur des approches statistiques ou dynamiques. La météorologie, la climatologie et la télédétection constituent les trois principales méthodologies (Goodarzi et al., 2021 ; Patnani et al., 2021). La réduction d'échelle statistique consiste à exploiter les relations entre les variables climatiques locales, telles que la température de l'air en surface et les précipitations, et les prévisions à grande échelle, afin d'évaluer les évolutions climatiques globales actuelles et futures (Arora et al., 2016 ; Jafarzadeh et al., 2021). Le « dynamic downscaling » est désigné comme l'application de simulations régionales à haute résolution afin de modéliser et d'étudier les répercussions des phénomènes climatiques de grande échelle sur les échelles régionales ou locales pertinentes (Sarkar et al. 2015; Arora et al. 2016; Jafarzadeh et al. 2021).

5 Les scénarios climatiques

5.1 SRES (Special Report on Emissions Scenarios)

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a rassemblé des experts et des modélisateurs dans le but d'élaborer des ensembles de scénarios, qui ont été validés par la procédure intergouvernementale du GIEC. Le rapport Scénario A (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 1990) analysait quatre trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre, incluant une trajectoire « de référence » (caractérisée par l'absence de politiques climatiques) et trois illustrations additionnelles de politiques climatiques en développement. L'annexe relative aux scénarios de 1992 (GIEC, 1992) examinait, quant à elle, les répercussions des incertitudes affectant la croissance économique, la démographie et les technologies sur les trajectoires d'émissions. La plus récente étude portant sur les émissions (SRES, Spécial Report on Emissions Scenarios, GIEC, 2000) examinait les répercussions des incertitudes associées à divers facteurs déterminants, tels que la démographie, le développement économique et la transformation technologique. Les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) se répartissent en quatre catégories principales (A1, B1, A2, B2), issues de la combinaison de deux ensembles d'hypothèses distincts :

la prédominance des valeurs économiques par rapport à l'augmentation des valeurs environnementales, et l'accroissement de la mondialisation par rapport à la régionalisation accrue (Figure 3).

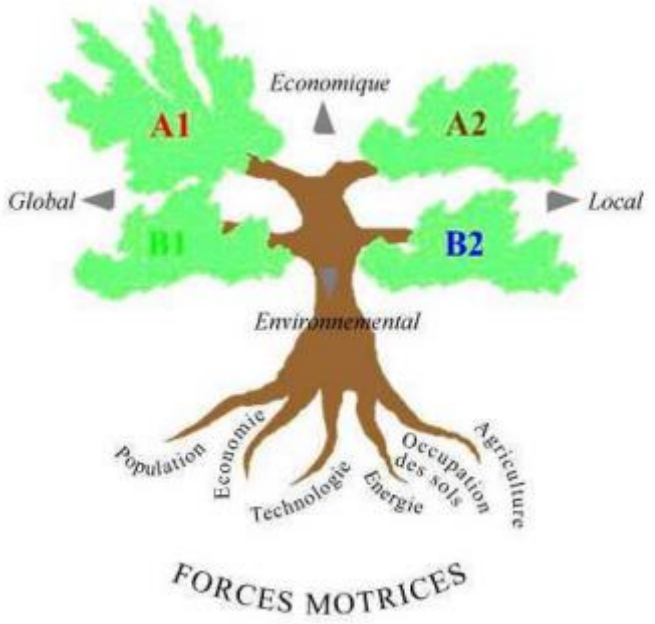


Figure 3 : Les Quatre familles de Scénarios SRES (Source : GIEC,2000)

5.2 « RCP » : Voies de Concentration Représentatives (Voies de Concentration Représentative)

Les trajectoires de concentration représentatives (RCP) dépeignent l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone (CO2), le méthane (CH4) et le protoxyde d'azote (N2O), ainsi que des aérosols et des gaz chimiquement actifs, dans l'atmosphère, sur la période allant de 2006 à 2100, avec une projection s'étendant jusqu'en 2300. Afin de s'affranchir du risque de déterminer un scénario médian, les chercheurs ont sélectionné ces quatre exemples en s'appuyant sur 300 scénarios présentés dans la littérature scientifique. Ces éléments ont fait l'objet d'une description dans un numéro spécifique de la revue Climatic Change, en relation avec les trajectoires d'évolution de l'affectation des sols. L'assignation d'une étiquette à chaque situation constitutive de ces quatre scénarios de concentration représentative (RCP) repose sur la valeur du forçage radiatif atteinte en 2100 : Des valeurs de 2,6 W/m², 4,5 W/m², 6 W/m² et 8,5 W/m² ont été mesurées (Figure 4). Le terme « représentatives » signifie que chaque trajectoire de concentration représentative (RCP)

n'expose qu'une unique éventualité parmi l'ensemble des scénarios envisageables conduisant à une valeur définie de forçage radiatif. Le terme « trajectoire » met en évidence que l'importance ne réside pas uniquement dans les niveaux d'influence radiative à long terme, mais aussi dans le cheminement emprunté pour atteindre ces objectifs. Les quatre profils représentatifs de concentration (RCP) ont été sélectionnés dans le but d'intégrer une gamme aussi vaste que possible de trajectoires potentielles du forçage radiatif futur. Seulement approximativement dix pour cent des scénarios rapportés dans la littérature excèdent la trajectoire RCP 8.5, laquelle est considérée comme la plus pessimiste en matière de changement climatique. Il se positionne légèrement en deçà du seuil de forçage radiatif associé au scénario A2 du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES). Les scénarios marqueurs A1B et B1 du rapport spécial sur les scénarios d'émission (SRES) présentent des similitudes avec les trajectoires de concentration représentatives (RCP) 6 et 4,5, respectivement. Le RCP 2.6, qui présente le plus fort potentiel d'atténuation du changement climatique, se distingue des scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) et ne dépasse qu'environ dix pour cent des projections modélisées dans la littérature scientifique (van Vuuren et al., 2011).

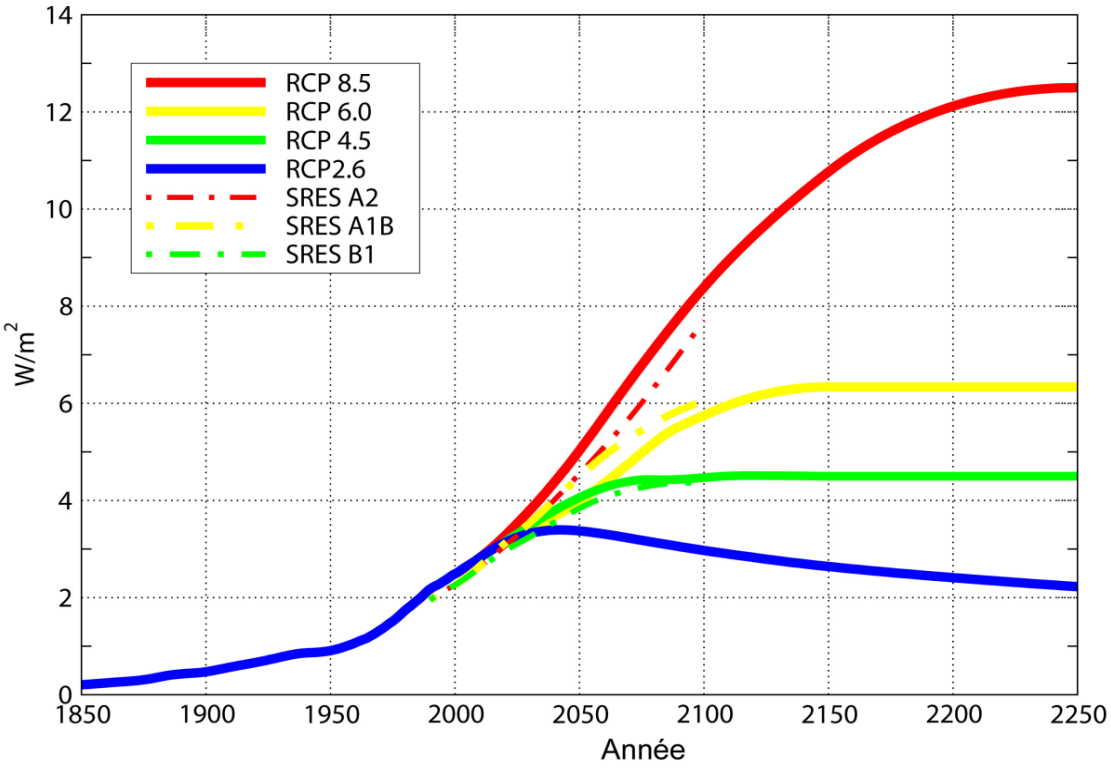


Figure 4 : Les quatre RCP, le développement du forçage radiatif et sa confrontation aux SRES (Source :Van Vuuren et al., 2011)

L'idée fondamentale de la nouvelle structure des scénarios est que ces quatre voies de forage radiatif ne sont pas liées à un seul cas d'émissions de gaz à effet de serre .

Bien que le contexte socio-économique soit unique, diverses combinaisons de changements économiques, technologiques, démographiques et institutionnels futurs peuvent en résulter. Les « SSP » et les « SPA » tentent d'explorer ces combinaisons. (Van Vuuren et al., 2011).

5.3« SSP » et « SPA » : itinéraires socio-économiques communs (itinéraires socio-économiques partagés) et Hypothèse des politiques partagées

L'architecture méthodologique des SSP repose sur une dissociation fondamentale entre les trajectoires socio-économiques et les projections climatiques, permettant ainsi l'application d'une approche matricielle pour analyser les impacts, la vulnérabilité et les coûts associés tant à l'atténuation qu'à l'adaptation face aux modifications climatiques. Chaque scénario SSP se compose de deux éléments complémentaires : d'une part, une description narrative des évolutions sociétales et économiques projetées jusqu'à la fin du XXIe siècle ; d'autre part, des données quantifiées décrivant la dynamique des variables motrices (démographie, produit intérieur brut, taux d'urbanisation, entre autres). Ces données quantitatives constituent des paramètres d'entrée exploitables par les modèles d'évaluation intégrée (IAM) ainsi que par les outils de simulation des impacts, de la vulnérabilité et des stratégies d’adaptation.

L'originalité de cette approche réside dans la séparation conceptuelle entre les décisions climatiques et l'ensemble des autres choix politiques (fiscalité, systèmes de santé, politiques éducatives, etc.). La structure matricielle permet, selon une lecture horizontale, de comparer les conséquences d'un forçage radiatif identique sous différentes configurations socio-économiques. Cette organisation autorise également l'analyse comparative des coûts de mitigation correspondant à un même niveau de forçage, mais déployés dans des contextes sociétaux distincts.Toutefois, pour un objectif de forçage donné, l'évaluation complète nécessite l'intégration des dépenses d'adaptation ainsi que des coûts liés aux effets résiduels (dégradation des services écosystémiques, stress thermique, etc.). L'estimation de ces coûts, de la vulnérabilité et des mesures d'ajustement s'effectue par le biais de modèles d'impact spécialisés. Par conséquent, chaque case de la matrice représente l'articulation entre stratégies

d'adaptation, politiques d'atténuation et impacts résiduels (Figure 5). Cette structure facilite l'organisation de programmes de recherche visant à explorer un large éventail de combinaisons pertinentes entre ces différentes dimensions (Kriegler et al., 2012).

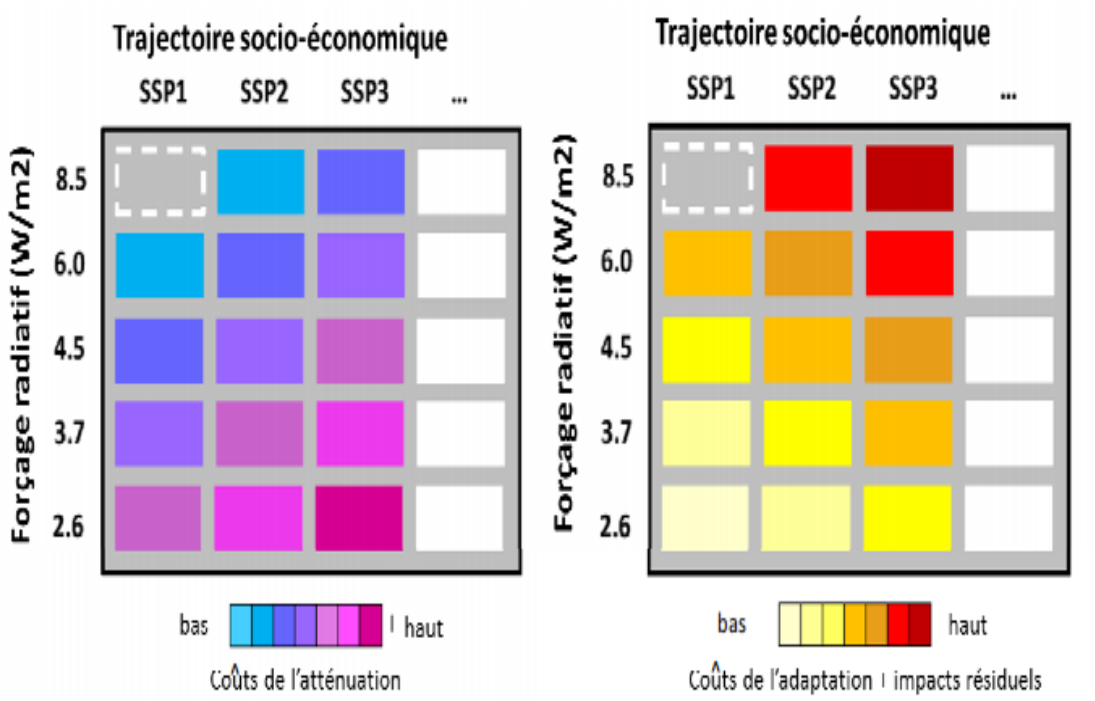


Figure 5 : Dans un contexte socio-économique spécifique, une appréciation « en matrice » des dépenses liées aux diverses politiques d'atténuation, d'adaptation et aux impacts postérieurs (Source : Arnell et al., 2011)

5.3.1 Choix du Scénarios SSPs

Cette génération inédite de scénarios SSPs facilite une intégration plus approfondie des mécanismes climatiques et permet d'explorer des résolutions temporelles et spatiales jusqu'alors non explorées dans les exercices antérieurs. De plus, elle fournit un contexte pour incorporer clairement les politiques d'atténuation et d'adaptation au climat, ce qui permet de juger des avantages et des dépenses liés aux politiques climatiques en fonction de diverses perspectives socio-économiques. Finalement, elle instaure une méthode innovante de travail qui consolide la coopération entre les diverses communautés d'étude du changement climatique (Guivarch et Rozenberg, 2013).

5.3.1.1 SSP1.9 Durabilité - Prendre la voie verte

Avec le temps, il est généralement observé une progression globale vers une trajectoire davantage axée sur la durabilité, privilégiant un développement plus inclusif et respectueux des limites environnementales identifiées. Cette évolution procède d'une sensibilisation accrue aux répercussions sociales, culturelles et économiques induites par la dégradation environnementale et les inégalités. Il est observé une amélioration graduelle de la gouvernance des communautés mondiales, facilitée par une collaboration accrue et persistante entre les organisations locales, nationales et internationales, le secteur privé et la société civile. L'investissement dans les domaines de l'éducation et de la santé contribue à accélérer la transition démographique, induisant ainsi une population comparativement réduite. Initialement, dans les nations à revenu élevé, l'attention se focalise sur l'économie plutôt que sur le bien-être des individus, même si cela implique une légère diminution de l'activité économique à long terme. L'inégalité se trouve réduite aux niveaux mondial et national, en raison d'un engagement accru en faveur de la réalisation des objectifs de développement. Il est observé une amélioration de l'efficience des ressources, une diminution de la consommation énergétique et matérielle globale, ainsi qu'une amélioration des conditions environnementales sur le long terme. L'accroissement des investissements, les bénéfices financiers et l'évolution des perceptions contribuent à rehausser l'attractivité des énergies renouvelables.

La consommation s'oriente vers une limitation de la croissance des matériaux et une diminution de l'intensité des ressources et de l'énergie. L'association de la promotion des technologies à faible impact environnemental, d'une orientation favorable aux énergies renouvelables, d'institutions stimulant la coopération internationale et d'une demande énergétique comparativement modeste engendre des difficultés d'atténuation relativement limitées. Parallèlement, les avancées en matière de bien-être individuel, conjuguées à la présence d'institutions robustes et adaptables aux niveaux mondial, régional et national, laissent présager une incidence limitée.

5.3.2.2 SSP4.5 Inégalité - Une route divisée

Des investissements en capital humain manifestement hétérogènes, conjugués à des disparités croissantes en matière d'opportunités économiques et politiques, sont observés. Il est constaté que la puissance engendre un accroissement des inégalités et

de la stratification, tant au niveau mondial qu'au niveau national. Avec le temps, une disparité croissante se manifeste entre une société internationale connectée, instruite et participant aux secteurs de la recherche et du capital de l'économie mondiale, et un ensemble fragmenté de sociétés à revenus inférieurs, caractérisées par un niveau d'éducation insuffisant et œuvrant dans une économie à forte intensité de main-d'œuvre et à faible technicité. Il ressort que, même au sein des sociétés démocratiques, le pouvoir tend à se concentrer entre les mains d'une élite politique et économique restreinte, tandis que les groupes vulnérables pâtissent d'une représentation limitée au sein des institutions nationales et internationales. Dans les économies industrialisées et à revenu intermédiaire, la croissance économique se révèle modérée, tandis que les nations à faible revenu accusent un retard, rencontrant fréquemment des difficultés pour garantir un accès suffisant à l'eau. Santé et prise en charge médicale des populations défavorisées. Il est observé une diminution de la cohésion sociale, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des conflits et de l'instabilité. La technologie connaît une expansion significative au sein de l'économie de pointe et des divers secteurs d'activité. L'incertitude entourant les ressources fossiles et les marchés des combustibles induit un déficit d'investissement dans l'exploitation de nouvelles ressources à l'échelle mondiale. La diversification des sources d'énergie permet aux entreprises énergétiques de s'adapter aux fluctuations tarifaires, par le biais d'investissements conjugués dans des combustibles carbonés, tels que le coke et le pétrole non conventionnel, et dans des sources d'énergie à faible teneur en carbone. La politique environnementale tend à privilégier les problématiques locales dans les régions à revenus moyens et élevés. La combinaison judicieuse de diverses options d'approvisionnement à faible teneur en carbone et de compétences, couplée à une intégration harmonieuse, est préconisée.

Une classe politique et économique internationale apte à agir avec célérité et résolution est confrontée à des défis mineurs. Les défis liés à l'adaptation concernent significativement les populations à faible niveau de développement, dont l'accès à des institutions aptes à atténuer les pressions économiques ou environnementales est limité.

5.3.2.3 SSP 5.8 Développement à énergie fossile - Prendre le chemin de fer

Motivé par la réussite économique des économies industrialisées et émergentes, ce monde accorde une importance croissante à la compétitivité. Les marchés, l'innovation et les sociétés participatives sont susceptibles de faciliter une progression

technologique accélérée et le développement du capital humain, constituant ainsi une voie vers un développement durable. Les marchés mondiaux présentent une intégration croissante, nécessitant des interventions ciblées sur la préservation de la concurrence et la suppression des entraves institutionnelles qui limitent la participation des groupes de population défavorisés. Les investissements dans les domaines de la santé et de l'éducation, ainsi que dans les institutions, s'avèrent également importants pour l'amélioration du capital humain et social. Simultanément, la poursuite du développement économique et social s'avère corrélée à l'exploitation des ressources fossiles abondantes et à l'adoption de modes de vie énergivores à l'échelle mondiale. L'ensemble de ces facteurs induit une expansion accélérée de l'économie globale. On observe une confiance dans l'aptitude à contrôler efficacement la société et l'environnement. Les systèmes, incluant potentiellement la géo-ingénierie en cas de nécessité. Bien que les répercussions environnementales locales soient traitées efficacement par le biais de solutions technologiques, on constate un manque d'initiatives visant à prévenir les conséquences environnementales à l'échelle mondiale, en raison d'un arbitrage perçu avec le développement économique. Au XXIe siècle, la population mondiale fluctue, présentant des augmentations et des diminutions. Bien que l'on observe une diminution rapide de la fécondité dans les pays en développement, les taux de fécondité dans les pays à revenu élevé se maintiennent à des niveaux relativement élevés (au-dessus du seuil de remplacement), ce qui s'explique par des perspectives économiques favorables. L'accroissement de la mobilité internationale s'observe concomitamment à l'ouverture graduelle des marchés du travail, corrélativement à une réduction des disparités d'échelle. La forte dépendance aux combustibles fossiles et l'indifférence globale envers les enjeux environnementaux engendrent des défis potentiellement significatifs en matière de réduction. La réalisation des objectifs de développement humain est corrélée à une croissance économique robuste et avancée. L'infrastructure actuelle se caractérise par une capacité d'adaptation aux potentiels changements climatiques relativement élevée, à l'exception de quelques cas spécifiques (Figure6) (O’Neill et al., 2017).

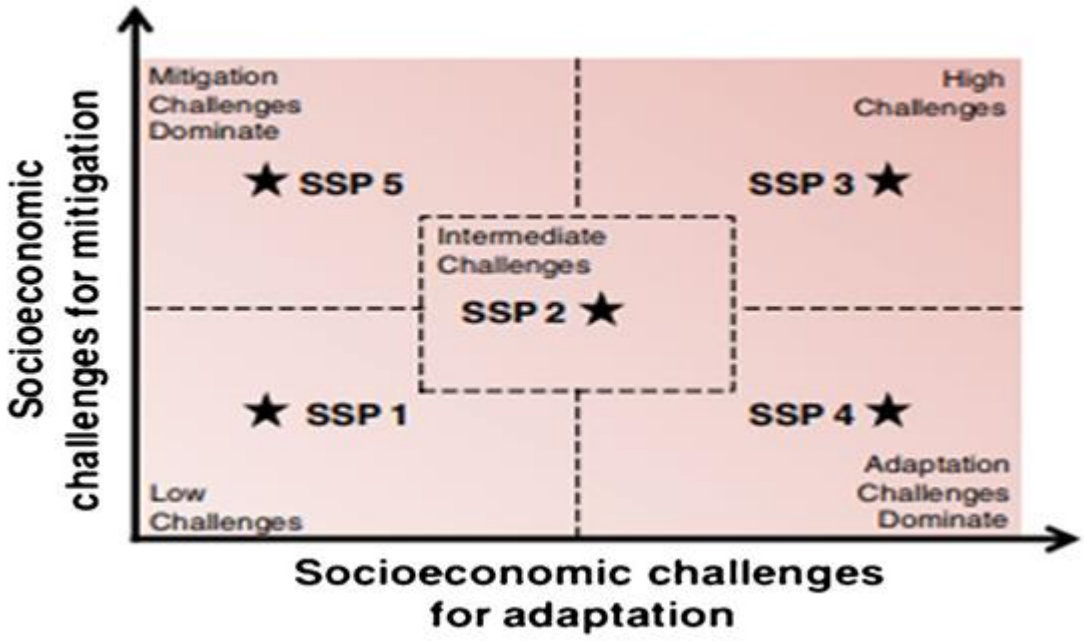


Figure 6 : Étendue des défis socio-économiques pour la réduction et l'adaptation (O'Neil et al., 2014)

6 Les incertitudes des prévisions climatiques

Deux types d'incertitudes fondamentales caractérisent les projections du climat futur (Hulme et Carter, 1999 ; New et Hulme, 2000). D'une part, les incertitudes scientifiques liées aux imperfections de la modélisation des mécanismes physiques, chimiques et biologiques – incertitudes amenées à se réduire avec le progrès des connaissances. D'autre part, les incertitudes socio-économiques associées à l'évolution imprévisible des sociétés humaines et aux orientations politiques des États, éléments structurants des scénarios d'émissions SRES. S'y superpose l'aléa inhérent à la dynamique non linéaire du système climatique, dont le caractère chaotique pourrait constituer une limite indépassable en termes de prévisibilité. Malgré les progrès substantiels accomplis dans la connaissance du système Terre, les modèles de circulation générale comportent encore des faiblesses notables (GIEC, 2008). Certains processus clés restent insuffisamment représentés, comme les flux d'évapotranspiration terrestres, les transformations biogéochimiques du méthane atmosphérique, ou la microphysique des formations nuageuses.

6.1 Méthodes de correction des données climatiques simulées

Il est essentiel d'utiliser des données de haute résolution de modèle climatique régional pour étudier les conséquences socioéconomiques et environnementales du changement climatique, notamment pour prévoir. Cependant, l'utilisation directe des résultats du modèle régional dans les études d'impact reste légèrement limitée en raison de leur biais vis-à-vis des données et de la nécessité de corriger les simulations improvisées (Teutschbein et Seibert, 2012 ; Ly et al., 2019). Différentes techniques de correction de biais sont disponibles pour corriger les simulations à venir en se basant sur la disparité entre les données observées et simulées pendant la période de contrôle et surtout les méthodes Delta et quantile-quantile (Tong et al., 2020 ; Mandez et al., 2020).

Les principales méthodes de corrections sont comme la suite :

- La méthode du Delta : implique de calculer un changement (ou une anomalie) qui correspond à la différence des moyennes entre une simulation de climat futur et la simulation de climat présent (Lenderink et al., 2007), en utilisant un changement moyen sur l'ensemble de la distribution des observations (Colin, 2010).

- La méthode de correction quantile-quantile (Q-Q) : L'estimation de la correction en fonction des quantiles de la distribution de probabilité de la variable en question est utilisée pour la méthode de correction quantile-quantile (Q-Q), également appelée quantile mapping (Déqué, 2007). Nous substituons un quantile de la distribution simulée par le même quantile de la distribution observée.

- La méthode de confiance : La méthode de confiance est la suivante : R*(j) = R (j) et S*(j) = S(j). Il n'applique aucune modification aux données brutes RCM et est utile lorsque les données du modèle sont relativement linéaires. (Déqué, 2007).

- La méthode de débiaisage : Cette méthode rectifie l'erreur moyenne mais suppose une variabilité RCM bonne. Étant donné que S*(d) = S(d)+(O-R), R*(d) = R(d) + O-R. L'avantage de cette méthode par rapport à la méthode d'anomalie est qu'elle facilite l'observation de la variabilité climatique journalière dans certaines régions. (Dequé2007).

• Les différentes méthodes de temps ou TT : Dans la série d'observation, les dates choisies sont :

j1 et j2, avec R*(j) = O (j1) et S*(j) = O (j2). Cette approche rassemble des méthodes similaires. Cette méthode a pour limite de pouvoir modifier la fréquence des événements météorologiquessans pouvoir générer des événements in enregistrés auparavant, ce qui n'est pas adapté, par exemple, à des températures très élevées en été. (Dequé, 2007).

Chapitre 2 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur la culture du blé

1 Introduction

L'évaluation de l'effet du changement climatique sur la culture du blé est un instrument crucial pour prévoir les enjeux à venir et concevoir des tactiques d'adaptation performantes. En dépit des obstacles et des contraintes, les avancées continues dans le secteur de la modélisation climatique et agro-météorologique favorisent l'exactitude des prévisions et une compréhension accrue des problématiques liées à la sûreté nutritionnelle face au changement climatique.

2 Notion du Modèle

Une représentation simplifiée de la réalité est un modèle qui nous permet de saisir le fonctionnement d'un système en réponse à une question .Chaque modèle se compose d'une part de la description de la structure du système, qui inclut les spécifications sémantiques intégrées (comme la nomenclature et les règles d'affectation du sens pour une source, l'étendue et la profondeur du consensus social qui donne du sens dans le cas d'une représentation d'acteurs), et d'autre part de la description des fonctionnements réguliers (ou non) et des dynamiques qui modifient cette structure au fil du temps.(Bousquet et al., 2002).

3 Construction et validation du modèle

La construction des modèles s'effectue par étapes successives. La première étape, jugée indispensable, réside dans la formulation précise du problème, impliquant la définition de son domaine d'application et des variables a priori concernées, l'explicitation des hypothèses émises et la sélection du niveau d'organisation considéré. Ultérieurement, une distinction est opérée entre l'aspect structurel (inventaire des éléments, des variables et de leurs relations) et l'aspect fonctionnel (construction des fonctions et des mécanismes), selon une approche similaire à celle employée pour la description d'un système. La représentation de l'architecture d'un modèle nécessite l'élaboration d'un graphe ou d'un organigramme, une démarche fréquemment adéquate pour la réalisation des objectifs visés.

De manière générale, la construction de fonctions induit l'estimation de paramètres spécifiques, étape susceptible d'engendrer des complexités significatives d'optimisation et d'ajustement. Par ailleurs, la validation d'un modèle est

intrinsèquement liée aux objectifs ayant motivé sa conception. L'analyse du fonctionnement d'un système peut être appréhendée par une démarche d'invalidation du modèle initial, permettant ainsi l'acquisition de connaissances nouvelles sur le système étudié, par l'examen des écarts observés entre les prévisions et les résultats. Dans le cadre d'une simulation, il est généralement postulé que « le modèle correspond à la réalité » (hypothèse nulle) ; la validation se rapporte à l'ajustement. Issus d'une démarche de représentation graphique, les modèles présentent invariablement un caractère incomplet. La validité de ces modèles est déterminée par les hypothèses simplificatrices formulées lors de leur conception et par la qualité du démantèlement du système étudié, laquelle est fonction des objectifs de l'étude et du plan d'expérience ou d'enquête. Le risque associé aux modèles se manifeste par un usage immodéré quant à leur validité ou à leur fonction (Poussin, 1987).

4 Modèle de culture

4.1 Définition

Les modèles de culture sont des outils efficaces pour évaluer le risque de cultiver une culture spécifique dans un contexte sol-climat spécifique et pour faciliter les choix de gestion afin de réduire 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).

4.2 Historique et Évolution du modèle de culture

En 1960, l'élaboration de modèles agricoles a débuté, instaurant un « système d'accumulation forcée » ainsi que des « mécanismes de régulation » des systèmes productifs, des parcours et des identités professionnelles agricoles. (Allaire, 1988). Ces modèles de culture découlent de l'étude de la photosynthèse et de la respiration initiée dans les années 1970 (De Wit et al., 1970), ainsi que de l'établissement d'une relation entre la biomasse accumulée et les processus instantanés. Simultanément, des corrélations se sont établies entre l'architecture de la canopée et la photosynthèse (Baker et Meyer, 1966 ; Duncan, 1971), en recourant à la notion d'indice de surface foliaire (ISF), introduite par Watson en 1947. Dans certaines configurations, une simplification de ces processus complexes a été opérée (Monteith, 1972) et a permis l'émergence de concepts inédits et plus universels, à l'instar de l'« radiation use efficiency (RUE) »

(Spaeth et Sinclair, 1985; Sinclair, 1986), laquelle est subséquemment employée comme une solution alternative pour les modèles de culture. (Brisson et al., 2006). Un équilibre fonctionnel est subséquemment intégré entre la croissance racinaire et celle des tiges, par le biais duquel les cultures tendent à maintenir une teneur en eau optimale (Penning de Vries et al., 1974). Par la suite, les variables d'état ont été introduites, intégrant des quantités telles que la biomasse, l'apport de nitrate dans le sol pour les plantes, ainsi que la teneur en eau du sol, c'est-à-dire, celles qui demeurent mesurables en l'absence de variation temporelle. Les variables de pilotage, qui rendent compte des interactions aux frontières du système, font l'objet de mesures régulières. Parmi les variables macro-météorologiques, on peut citer les précipitations, le vent, la température et le rayonnement. Il est tributaire de ces bornes afin de déterminer l'équivalence des variables de gouvernance, de statut ou de taux. À titre d'illustration, la quantité de chaleur accumulée dans une canopée végétale constitue une variable d'état dès lors que le système considéré incorpore des paramètres micro-météorologiques. Divers facteurs sont mobilisés afin de déterminer le modèle approprié pour une recherche spécifique. Cette sélection se fonde principalement sur l'objectif de la modélisation, la pertinence du modèle pour atteindre cet objectif, ainsi que sur son domaine d'application. Le modèle doit illustrer les processus centraux qui influent sur les variables d'intérêt. Ultérieurement, il s'avère impératif d'évaluer la facilité d'utilisation d'un modèle existant. Plus l'utilisateur final ne maîtrise les formalismes du modèle et leur organisation, plus sa capacité à les exploiter s'en trouvera accrue. Il convient de mesurer l'entraînement dès lors que les aspects micro-météorologiques sont exclus du système. (De Wit et Rabbinge, 1979). Dans des contextes de disponibilité limitée en eau et en azote, le premier modèle de simulation de l'azote du sol a été élaboré en 1981 afin de prédire les réactions des cultures (Seligman et van Keulen, 1981). Ce modèle a constitué le fondement d'autres modèles de simulation de l'azote dans le sol, notamment APSIM, DSSAT, ainsi que d'autres modèles de culture. Les modèles CERES (maïs et blé) et GRO (SOYGRO et PNUTGRO) ont été actualisés entre 1982 et 1986. Ces modèles, établissant une corrélation globale inédite entre l'eau et l'azote présents dans le sol, ont été employés pour la modélisation des cultures dans de nombreuses régions. Le développement de modèles de système terrestre (MST), qui s'inscrivent dans la catégorie des modèles de circulation générale (MCG) et intègrent

des variables physico-chimiques, écologiques et socio-économiques au sein d'un cadre unifié, a favorisé l'avènement d'approches novatrices visant à incorporer des modèles de simulation de cultures aux schémas de surface terrestre des modèles climatiques numériques (Challinor et al., 2004). Récemment, leur application s'est également étendue à l'étude de l'incidence de la variabilité climatique et de l'influence d'El Niño/oscillation australe (ENSO) sur la production agricole et la sécurité alimentaire. Il est prévu qu'avec la disponibilité accrue des ordinateurs, l'utilisation des modèles de culture par les agriculteurs, les consultants ainsi que par les responsables politiques et décisionnels s'intensifie. (Hoogenboom, 2000).

4.3 Construction et validation du modèle de culture

De manière générale, la construction de fonctions induit l'estimation de paramètres spécifiques, étape susceptible d'engendrer des complexités significatives d'optimisation et d'ajustement. Par ailleurs, la validation d'un modèle est intrinsèquement liée aux objectifs ayant motivé sa conception. L'analyse du fonctionnement d'un système peut être appréhendée par une démarche d'invalidation du modèle initial, permettant ainsi l'acquisition de connaissances nouvelles sur le système étudié, par l'examen des écarts observés entre les prévisions et les résultats. Dans le cadre d'une simulation, il est communément admis que le modèle représente adéquatement la réalité (hypothèse nulle) ; la validation correspond alors à son ajustement. Issus d'une démarche de représentation graphique, les modèles se caractérisent invariablement par leur caractère incomplet. La validité des modèles est déterminée par les hypothèses simplificatrices formulées lors de leur élaboration et par la qualité du démantèlement du système étudié, laquelle est fonction des objectifs de l'étude et du plan d'expérience ou d'enquête. Le risque associé aux modèles se manifeste par un usage immodéré quant à leur validité ou à leur fonction (Poussin, 1987).

4.4 Type du modèle de culture

Dans le domaine de l'agronomie, on distingue généralement deux grands de modèles : les modèles statistiques ou empiriques et les modèles mécanistes.

4.4.1 Les modèles statistiques

Également désignés par des appellations empiriques. Les modèles statistiques représentent des abstractions simplifiées qui mettent en évidence la réponse d'une variable spécifique en fonction de variables explicatives (Wallach et al., 2018). Dans ce type de modèle, l'objectif n'est pas d'illustrer le fonctionnement du système, mais plutôt de déterminer une corrélation. Il s'agit d'établir des relations mathématiques entre les variables explicatives et les variables non explicatives. Dans le domaine de la recherche portant sur les conséquences du changement climatique, ces modèles sont couramment utilisés en raison de leur simplicité conceptuelle (Lobell et Burke, 2010). Ils nécessitent une configuration limitée et peuvent être employés en l'absence d'un modèle mécaniste spécifique à une culture donnée. Néanmoins, ces modèles présentent des vulnérabilités, notamment la colinéarité entre les différentes variables (par exemple, la température et les précipitations) et les hypothèses relatives à la constance du processus dans le temps (Lobell et Asseng, 2017).

4.4.2 Les modèles mécanistes

Également désignés sous les appellations d'agronomiques ou de culture, ces modèles plus complexes visent à illustrer le mode opératoire du système considéré. Par conséquent, ils représenteront les différents constituants du système, leurs interrelations, ainsi que leur dynamique soumise à l'influence de l'environnement extérieur. À titre d'illustration, il est possible de simuler l'incidence de la disponibilité hydrique sur le développement foliaire, puis le processus photosynthétique, afin de prédire la quantité de biomasse sur une période quotidienne. Ces modèles sont principalement utilisés pour appréhender le fonctionnement du système, vérifier des hypothèses relatives à ce dernier ou établir un diagnostic concernant une situation spécifique. Ces modèles sont susceptibles d'intégrer une multitude de paramètres dont la valeur demeure parfois indéterminée.

Préalablement à sa mise en œuvre, un modèle requiert une calibration et une évaluation sur le terrain, lesquelles visent à vérifier sa capacité à estimer adéquatement les variables d'intérêt en réponse aux variations environnementales, à l'instar de l'impact de la disponibilité hydrique sur le rendement, par exemple. Cette phase de calibration permettra de définir le domaine d'application du modèle, à savoir l'ensemble des

contextes agropédoclimatiques au sein desquels ses performances se révéleront adéquates ou satisfaisantes. Au cours des dernières années, une tendance à la simplification de la description des processus, par la réduction du nombre de formalismes et, par conséquent, du nombre de paramètres, a mené à l'élaboration de modèles agro-climatiques exigeant un nombre limité de paramètres (Zhao et al., 2019).

4.5 Application de la modélisation de la croissance des cultures

4.5.1 Prévision du rendement

Selon Iizumi et ses collaborateurs (2018), la prédiction du rendement à l'échelle mondiale présente un avantage par rapport à la prévision régionale, car elle renseigne sur les variations potentielles du rendement dans les pays exportateurs et importateurs, fournissant ainsi des données essentielles aux organisations du secteur alimentaire chargées de maintenir les équilibres alimentaires nationaux. Ces mêmes auteurs ont utilisé ces informations relatives aux prévisions saisonnières de température et de précipitations afin d'implémenter des modèles statistiques permettant de simuler les rendements globaux des quatre cultures suivantes : maïs, soja, riz et blé. Cette technique a rendu possible une prédiction fiable, trois mois avant la récolte, en exploitant des données de prévisions saisonnières globales relatives aux températures et aux précipitations, lesquelles sont issues d'un ensemble multi-modèles climatiques.

4.5.2 Date de semis optimale pour la culture du blé

Selon Trépos et al. (2014), un itinéraire technique se définit comme l'ensemble des opérations techniques mises en œuvre durant un cycle de production, incluant la préparation du sol, le semis (caractérisé par sa densité et la variété), l'apport d'azote, ainsi que les traitements techniques appliqués. L'agriculteur détermine une modalité technique et une échéance d'exécution pour chacune de ces opérations, certaines de ces décisions étant néanmoins contraintes par la disponibilité de l'exploitant ou la faisabilité d'une intervention. De manière générale, les agronomes mettent en œuvre et associent trois principales catégories de méthodes dans le but d'élaborer de nouvelles stratégies techniques répondant à divers objectifs agronomiques, économiques et environnementaux. Les modèles de culture permettent de simuler les croisements végétaux et de faciliter la prise de décisions efficientes concernant la planification des semis des parents dans différents environnements.

4.5.3 Gestion de la culture

Dans le but de résoudre des problématiques complexes liées à la gestion des cultures, notamment la planification de la fertilisation ou de l'irrigation, des simulateurs spécialisés ont été développés par des scientifiques. Les modèles mécanistes, fondés sur les lois de la nature, sont mis en œuvre avec une expertise approfondie dans le but de simuler de manière fiable des phénomènes physiques, chimiques et/ou biologiques (Sokolowski et Banks, 2012). Ces modèles ont fréquemment évolué en logiciels complexes, résultat de décennies de recherche et de développement collaboratifs. Les modèles culturaux, fréquemment désignés comme modèles de culture fondés sur les processus, consistent en des modèles mécanistes employés par un utilisateur dans le but de simuler l'évolution des cultures, typiquement à l'échelle des arbres. Ils permettent de reproduire par simulation les interactions entre les cultures, le sol, l'atmosphère et les opérations agricoles, telles que la plantation et la fertilisation (Wallach et al., 2018).

À titre illustratif, le Système d'Aide à la Décision pour le Transfert de l'Agro-technologie. DSSAT (Hoogenboom et al., 2019) représente un modèle de croissance de haute qualité, élaboré sur une période de trente ans. DSSAT est largement reconnu par la communauté des agronomes pour ses capacités de simulation des cultures. Il se fonde sur l'intégration continue d'un système d'équations aux dérivées partielles, lequel décrit les divers processus impliqués. À titre d'illustration, les dynamiques de l'azote sont partiellement tributaires des dynamiques pédologiques (par exemple, les processus de minéralisation ou les flux hydriques dans le sol) et de l'absorption par les plantes, laquelle est également influencée, en partie, par des phénomènes physiologiques tels que l'allocation des hydrates de carbone chez les plantes, en fonction des stades de croissance. Les modèles culturels peuvent être employés en tant qu'outils exploratoires pour identifier les méthodologies de gestion les plus appropriées. À titre d'illustration, He et al. (2012) ont déterminé, par le biais de simulations, les méthodologies d'irrigation et de fertilisation optimales pour la culture du chou-fleur en Floride, aux États-Unis.

4.6 Impact des changements climatiques sur la production agricole

Les activités agricoles ne sont pas exemptes du débat sur les évolutions mondiales, avec en particulier les risques qui pèsent sur la sécurité alimentaire mondiale en raison de l'augmentation de la demande liée à la poursuite de la croissance

démographique (HLPE, 2012), d'autre part. Les changements climatiques ont des conséquences néfastes sur les rendements des cultures et déclenchent une demande accrue en eau pour les plantes (Faye et al., 2018).

L'accroissement de la fréquence des périodes de sécheresse et de forte pluviosité est considéré comme l'une des conséquences les plus importantes du changement climatique (Richard et Heim, 2002). Les altérations du régime pluviométrique sont susceptibles d'induire des répercussions tant favorables que défavorables sur la production agricole. D'une manière générale, il est observé que les fluctuations de la pluviométrie exercent un effet délétère sur le rendement des cultures dans les zones humides, tandis qu'une corrélation positive est constatée entre ces fluctuations et le rendement dans les environnements semi-arides et arides (Xiao *et al.,* 2008). Lesk et ses collaborateurs (2016) ont procédé, pour la première fois à l'échelle mondiale, à une évaluation des pertes de production céréalière imputables aux catastrophes météorologiques extrêmes survenues entre 1964 et 2007. Il a été conclu que le déficit de production, estimé à moins neuf pour cent (- 9 %) et résultant des sécheresses, est associé à une réduction tant de la superficie récoltée (diminution de - 4,1 %) que des rendements (diminution de 5,1 %), tandis que le déficit de production, estimé à moins dix pour cent (- 10 %) et induit par les chaleurs extrêmes, est exclusivement corrélé à la baisse des rendements céréaliers de 7,1 %. Selon ces auteurs, les sécheresses prolongées présentent un risque de destruction intégrale des terres arables et d'échec des semis, tandis que les températures extrêmes sont susceptibles d'affecter les stades de développement des cultures. D'après Lesk *et al.* (2016), l'impact le plus conséquent de la sécheresse sur la production dans les pays développés s'est manifesté par un déficit de rendement substantiel de -15,9 %, sans qu'une diminution notable des superficies cultivées ait été observée. Conformément à cette conclusion, il a été proposé que, dans les nations à revenu modeste, les systèmes de cultures diversifiées mis en œuvre sur des parcelles de petite taille, et fondés sur des stratégies d'atténuation des risques climatiques, présentent une résilience supérieure face à la sécheresse comparativement aux systèmes de monoculture à grande échelle, lesquels visent à optimiser les rendements dans les pays développés.

L'exploitation de la fluorescence chlorophyllienne pourrait constituer un outil pertinent pour l'évaluation de la résistance du blé dur aux basses températures et au

stress hydrique. Les critères d'évaluation sont sélectionnés en fonction du site d'action du stress considéré au sein de l'appareil photosynthétique (Dekkaki et al., 2000).

4.7 Impact du CO2 sur la culture du blé

Les scénarios climatiques, élaborés pour le XXe siècle sous diverses contraintes de dioxyde de carbone, ont été dérivés de modèles de circulation générale. Aperçu général du Centre Hadley et du Laboratoire de météorologie dynamique. Les résultats ont été obtenus par simulation, grâce au modèle de culture STICS. L'analyse des données révèle que l'effet de fertilisation du CO2 atténue les conséquences négatives de la température en induisant une augmentation des rendements. La capacité des plantes à tirer pleinement profit de l'accroissement du dioxyde de carbone est restreinte par des facteurs tels que les organismes nuisibles, les adventices, la qualité du sol et de l'eau, ainsi que la disponibilité de l'eau. Les modèles de simulation présentent une prise en considération insuffisante de ces facteurs limitatifs. L'existence de cette lacune induit une incertitude significative dans les projections concernant l'impact du dioxyde de carbone sur les cultures. Il s'avère indispensable d'employer des modèles plus sophistiqués afin d'intégrer ces facteurs limitatifs et de fournir des simulations plus fidèles à la réalité. Parallèlement, il convient de considérer une plage de sensibilité dans les estimations de rendement, afin de tenir compte de l'incertitude associée aux effets du CO2 sur les cultures (GIEC, 2007b). Une élévation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone stimule la cinétique de la photosynthèse, induisant ainsi une augmentation de la productivité et du rendement en biomasse sèche. Yana (1999). Dans leur étude portant sur le piémont de la plaine côtière du Sud-Est des États-Unis, Dhakhwa et C. Lee Campbell (1998) ont simulé une augmentation des rendements pour le maïs de 17 à 18 %, pour le soja de 28 à 32 % et pour le blé de 23 à 31 %. Selon Hulme et collaborateurs (1999), l'accroissement de la concentration en CO2 induit une augmentation des rendements agricoles comprise entre 9 et 39 % pour l'ensemble de l'Europe, en fonction du scénario climatique considéré.

4.8 Impact des aérosols sur la culture du blé

Les aérosols dans l'atmosphère empêchent l'augmentation de la température, ce qui réduit le taux de chute des retours mais augmente leur diversité. En résumé, la croissance du blé en Beauce connaît une légère baisse avec une augmentation de deux

fois du niveau de CO2. Le gaz carbonique est susceptible de stimuler la croissance des plantes et d'accroître la production de grains et de matière sèche. En résumé, un doublement du CO2, avec tous les autres effets combinés, entraîne une légère baisse des retours par rapport à la situation actuelle, avec une baisse de 7% pour LMD et de 4% pour HAÏ. Il semble que l'augmentation des aérosols riches en souffre dans l'atmosphère ait un effet positif, réduisant la baisse des rendements à 3 %. Plus ils sont concentrés, plus de petites gouttelettes se forment, plus l'albédo augmente, ce qui entraîne une baisse de température. Malheureusement, ces aérosols ne restent dans l'atmosphère que quelques mois au maximum. (Bellia, 2003).

4.9 Impact des changements climatiques sur le cycle cultural

A titre d'exemple, En Normandie, Les prévisions de la phénologie et les résultats de culture de l'agrosystème céréalier régional à la fin du XXIe siècle. La modélisation bioclimatique utilisée repose sur les données CNRM-2014 du CNRS et de Météo-France provenant du modèle régional ALADIN-Climat pour trois scénarios RCP du GIEC. Si les dates de semis demeurent inchangées entre 2050 et 2100 et si le changement climatique est important, l'augmentation des températures entraînerait un raccourcissement du cycle et donc une anticipation calendaire de la phénologie. Cela permettrait d'éviter un écart entre la fin du cycle et l'été, avec des épisodes de sécheresse et de vagues de chaleur dont la fréquence pourrait augmenter dans les décennies à venir. Par conséquent, l'échauffement thermique et le manque d'eau seraient inférieurs à ce que l'on pouvait penser. Cependant, cette précocité risque de perturber des étapes plus précoces de croissance du blé tendre : des températures basses à la méiose et un manque de rayonnement au début de la montée. En outre, l'augmentation de la douceur des hivers pourrait entraîner une baisse. En outre, une augmentation de la température pendant les hivers pourrait entraîner une réduction du nombre de jours de vernalisation, étape essentielle pour la floraison des variétés herbivores. (Beauvais et al., 2019).

Néanmoins, il est possible que ces situations soient influencées par l'examen de l'interaction avec les pratiques culturales, notamment l'irrigation, la fertilisation et la détermination de la date de semis (Ventrella et al., 2012). D'après Lhomme et al. (2009), un ensemencement précoce apparaît susceptible d'atténuer les effets délétères des changements climatiques futurs sur le blé dur dans la région méditerranéenne. Il

apparaît qu'une croissance prolongée et une épiaison précoce contribuent à l'augmentation du rendement du blé dur dans la région . Il est suggéré que la vigueur précoce exerce un rôle déterminant sur le rendement, en permettant ainsi d'éviter les températures basses potentiellement induites.

Ils surviennent au moment du tallage et peuvent également survenir pendant l'anthèse. Il apparaît que cette force exerce un effet bénéfique sur le remplissage des grains lors des périodes de sécheresse survenant en fin de cycle du blé.

L'exploitation de la fluorescence chlorophyllienne pourrait constituer un outil pertinent pour l'évaluation de la résistance du blé dur aux basses températures et au stress hydrique. Les critères d'évaluation sont sélectionnés en fonction de la localisation de l'action du stress considéré au sein de l'appareil photosynthétique. (Dekkaki et al., 2000).

Le semis dynamique est exceptionnellement considéré comme un instrument de recherche et d'innovation au service d'une agriculture durable, de la sécurité alimentaire et de la nutrition (Chourghal et Huard, 2020).

4.10 Interactions entre les impacts climatiques et l'importance du choix du l'itinéraires techniques

Les résultats issus des modèles de régression semi-logarithmique ont mis en évidence que la performance des différentes cultures céréalières était sujette à l'influence des conditions météorologiques ainsi qu'aux progrès technologiques. L'examen de l'incidence du changement climatique sur les rendements céréaliers dans la région de Béja (Nord-Est de la Tunisie), sur la base des scénarios issus du modèle HadCM3, a révélé un impact substantiel d'ici 2030. Cet effet s'avérera d'autant plus manifeste dans le cas du blé tendre. En conséquence, il apparaît essentiel de favoriser la recherche portant sur de nouvelles techniques agricoles, d'encourager la diffusion de variétés tolérantes à la diminution des précipitations durant les phases de croissance critiques, et de promouvoir les variétés précoces, dans le but d'atténuer les effets du changement climatique sur les rendements céréaliers à long terme (Chebil et al., 2011). La production de blé dur en Tunisie est principalement entravée par la variabilité interannuelle des précipitations et leur répartition irrégulière. La productivité de cette

culture s'avère élevée lors des périodes d'irrigation. Elle est limitée par la pénurie et les modalités de gestion des ressources hydriques (Khila et al.,2015).

Une étude menée par Muller (2016) en Chine a révélé une augmentation des températures et des précipitations en 2050 dans les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5. Il a été conclu que, durant la première moitié du XXIe siècle, les cultures pluviales (maïs, blé et riz) seront principalement affectées par les précipitations, tandis que, pour les cultures irriguées, l'augmentation du CO2 constituera le principal facteur influençant leur rendement, l'augmentation de l'ET0 exerçant une influence moindre. Néanmoins, il a été signalé que les augmentations de rendement pour le riz et le blé sous irrigation surpassent celles obtenues pour le maïs irrigué. Il ressort de ceci que le CO2 exerce un effet fertilisant plus significatif sur le sol. Étant donné l'accroissement du niveau de CO2 selon le scénario RCP 8.5, une augmentation des rendements est également constatée. Selon l'Évaluation internationale des sciences et technologies agricoles pour le développement (IAASTD, 2009), les pratiques agricoles et divers intrants, tels que les fertilisants, les pesticides et les herbicides, exercent une influence sur les rendements agricoles, en fonction du niveau de développement des pays concernés. De même, les dates d'occurrence des diverses phases phénologiques sont susceptibles d'être affectées par les évolutions climatiques à venir. Concernant le semis direct, il est à noter que les régions de Bordj Bou Arreridj et d'Alger présentent une précocité tant au niveau de la période de semis que de celle de la récolte, induisant une réduction du cycle végétatif de seize jours en moyenne. Le déficit hydrique agricole (DHC) et l'indice de stress hydrique (ISH) présentent des valeurs supérieures à Bordj Bou Arreridj comparativement à Alger ; toutefois, une augmentation plus substantielle de ces paramètres est anticipée à Alger, eu égard aux projections climatiques futures. La méthode de semis direct pratiquée à Bordj Bou Arreridj se traduit par une amélioration significative du bilan hydrique de la culture, caractérisée par un taux d'augmentation de +6 %. Le climat exerce une influence considérable sur la performance effective dans les deux régions considérées (Chourghal et Huard, 2020).

L'accumulation de matière sèche est réalisable dans des conditions d'alimentation hydrique optimales, et l'augmentation anticipée du niveau de CO2 atmosphérique s'avère suffisante pour maintenir les rendements actuels (Chourghal et Huard, 2020).

Partie 2 : Matériel et méthodes

1. Introduction

L'étude débute par une description agro-climatique de la zone et du site d'étude, permettant de caractériser le contexte environnemental et climatique de la recherche. Elle se poursuit par une justification du choix du modèle de culture AquaCrop, sélectionné pour sa capacité à simuler la croissance, la productivité et la réponse des cultures aux variations climatiques. Les données d'entrée du modèle, comprenant les paramètres climatiques, édaphiques (sol) et culturaux, sont ensuite décrites et préparées pour le calibrage et la validation du modèle. Enfin, les données climatiques futures, issues des scénarios socio-économiques partagés (SSP) et des modèles climatiques correspondants, sont présentées afin de simuler les conditions futures et d'évaluer leurs impacts potentiels sur la production du blé dans la région d'étude.

2 Position géographique

Sétif, située dans la région semi-aride de Nord-Est de l'Algérie, englobe les hautes plaines de Sétif, allant de la latitude 36° 10' N à la longitude 5° 21' E, avec une altitude d'environ 980 mètres au-dessus du niveau de la mer. La Willaya de Sétif a une superficie 6504 km (630 000 ha) soit 0,27% du territoire national. Elle est limitée par la Willaya de Mila à l'Est, Borj Bou Arreridj de l'Ouest, Bejaïa et Jijel au Nord et par Batna et Msila au sud .Sétif est célèbre pour son rôle important dans la culture du blé et a été appelé le "grenier de Rome" en raison de sa capacité à produire du blé durable .Notre étude est réalisée au niveau de l'exploitation agricole expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif pendant la campagne agricole des trois années suivantes, 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024. Les coordonnées géographiques du site sont 36° 17' N, 5° 36' E. Cette altitude est de 980 mètres.

2.1 Les reliefs

La wilaya de Sétif est composée de trois zones géographiques :

2.1.1 Zone montagneuse

Elle est dominée par des montagnes boisées au Nord. Pour commencer, la chaîne des « Babor » qui atteignent environ 2004m d'altitude. La deuxième chaîne montagneuse est composée d'un groupe de montagnes assez disparates qui partent de l'Est vers l'Ouest en traversant le Djebel Tachouda, Megres, Laanini, Tafet, les montagnes de Guenzet et Zemoura jusqu'à l'extrémité de la chaîne des Bibans. Les monts de Boutaleb font partie de la troisième

chaîne montagneuse, qui englobe une grande partie du sud de la wilaya, avec des altitudes pouvant atteindre 1890m.

1.1.2 Zone des hautes plaines :

Constitue 50 % de la surface totale de la Wilaya, qui présente un relief assez plat, avec des hauteurs variant de 900 à 1200 mètres. Bien que leur aspect soit plat, les mamelons de montagne, Djebel Youcef et Braou, ont été trouvés dans cette zone.

1.1.3 Zone de dépression sud :

Située dans le Sud et Sud Est de Willaya, couvrent 10% de la zone, elle se caractérise par ses dépressions salées contient des bassins où les chotts s'étendent : Chott El Beida situé près de Hammam Sokhna, Chott El Frein à proximité d'Ain Lahdjar et Chott El Melloul non loin de Guellal.

2.2 Sol, topographie et géologie

Le sol de la région de Sétif se répartit principalement en cinq catégories distinctes, parmi lesquelles les sols calcaires constituent la moitié, suivis par les sols insaturés, calciques, salins et alluviaux. Les sols de la région septentrionale se caractérisent par une profondeur importante et une texture variant d'argileuse à argilo-limoneuse, et présentent fréquemment une faible teneur en humus. En zones montagneuses, les sols alluviaux et calcaires présentent une prédominance. La portion méridionale, caractérisée par sa platitude, se compose principalement de sols calcaires, présentant fréquemment des horizons calcarifères indurés, de cohérence variable. Des zones et des motifs de sols bruns, rouges ou profonds se développent entre ces deux domaines et dans la région méridionale. 60% des terres sont situées dans les plaines, où les précipitations annuelles varient entre 250 et 400 mm par an. 40% des terres restantes se situent dans les zones de piémont, où les précipitations moyennes peuvent atteindre environ 500 millimètres par an (Djaouti,2010).

2.3 Climat de la région

2.3.1 La sécheresse

Elle a des conséquences néfastes sur les rendements des cultures céréalières, qui s'étendent en moyenne sur 46 jours par an. D'après Fenni (2013), on constate déjà une sécheresse dans les Hautes Plaines sétifiennes, où 13 années sur 31 ont connu des niveaux de précipitations en dessous de la moyenne. Cette variabilité de la pluie diminue la quantité d'eau

présente dans le sol et représente le facteur majeur qui restreint la production de céréales lors de conditions pluvieuses.

2.3.2 Les gelées

Les gelées sont très fréquentes dans cette zone, généralement survenir entre le début de mois de Novembre j'jusqu'à la fin d'Avril, Il est important de souligner les conséquences néfastes des gelées sur le rendement des céréales.

2.3.3 Le vent

Connus par le nom de siroccos, débutent au mois de Mai et peuvent rallonger jusqu'au mois d'Octobre. À une hauteur de 10 mètres, la vitesse du vent peut aller de 2,1 à 5,5 m/s. Une bonne portion de la zone est affectée par des vitesses allant de 3 à 4 m/s, alors que la région Est, qui comprend l'importante ville de Sétif, est entourée d'une superficie où la vitesse du vent n'excède pas 3 m/s. D'un autre côté, une zone assez marquée par une vitesse du vent avoisinant les 5.5 m/s, au Nord-Ouest de la zone examinée (Mohammed et Salima, 2014). De plus, le climat est influencé par le Sirocco, un vent du sud chargé de poussière provenant du désert qui peut atteindre la force d'un ouragan, il constitue un élément marquant du système climatique régional (Ahmim et Labiod, 2020).

2.3.4 Précipitation

La pluviométrie, qui est irrégulière et dispersée en temps et répartition, varie annuellement entre 900 et 200 mm du nord au sud. Cette variabilité climatique, associée aux prévisions de changements de température et de précipitations (figure7).

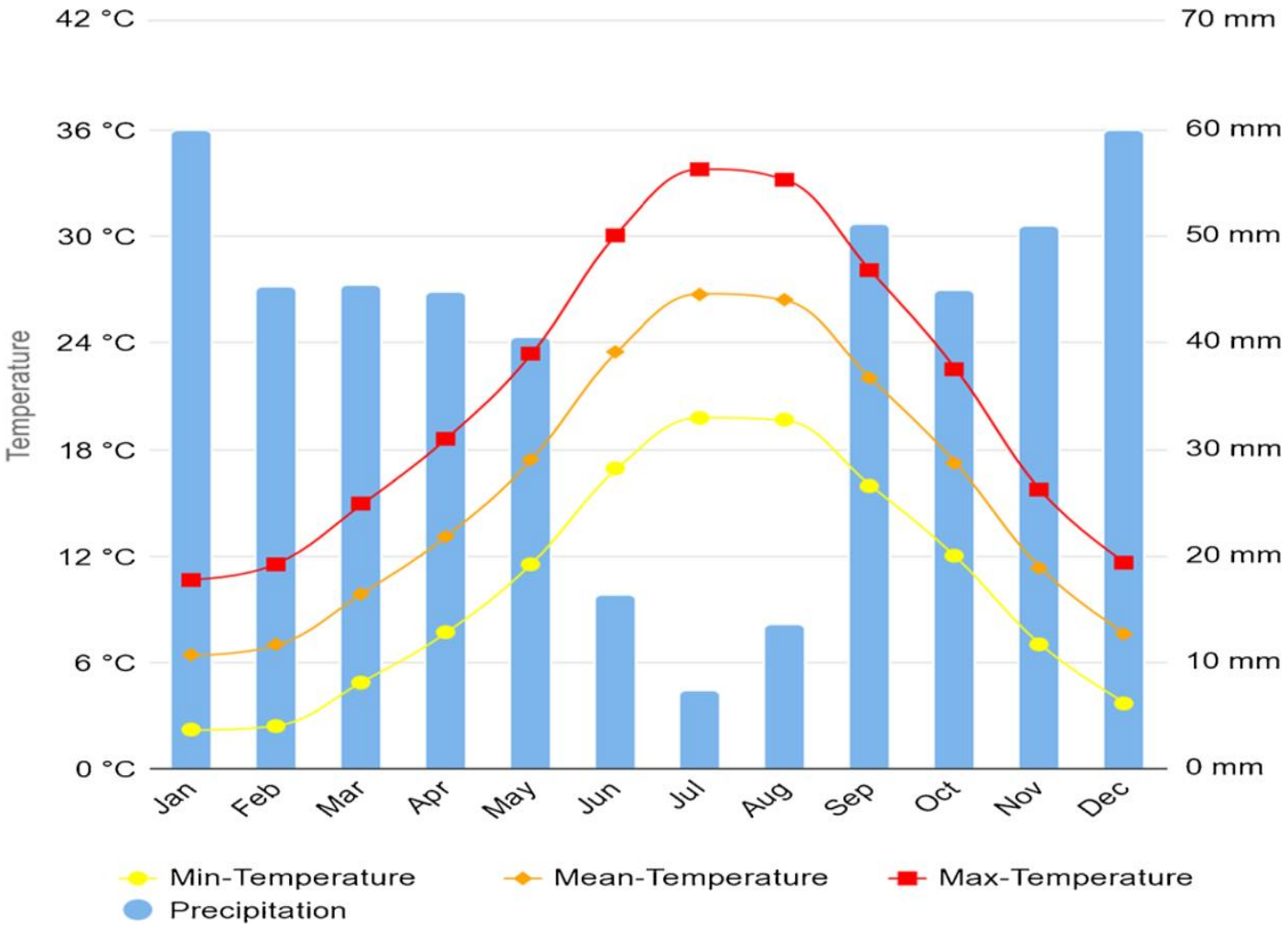


Figure 7 : Climatologie mensuelle des températures minimales, maximales, moyenne des températures et précipitations dans la zone du Sétif entre 1991 et 2020 (CCKP 2023)

2.3.5 Température

L'examen des températures moyennes par mois au sein de la commune de Sétif de 2002 à 2022 révèle que : les intervalles les plus glacials, de décembre à mars, sont définis par les températures minimales, alors que durant les autres mois, les températures ont tendance à être plus élevées. En janvier, on enregistre une température moyenne minimale de 4,73 °C, contrairement à une température moyenne maximale de 24,99 °C enregistrée en juillet.

3 Site et procédures expérimentales

L'expérimentation de cette étude a été menée durant trois saisons successives : 2021/2022, 2022/2023 et 2023/2024, au sein de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, en Algérie (36°.17'09'' N, 5°.36'49''E) (Figure 8). Le climat de la région est

de type méditerranéen continental, appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers froids et humides (Chenafi et al., 2006).

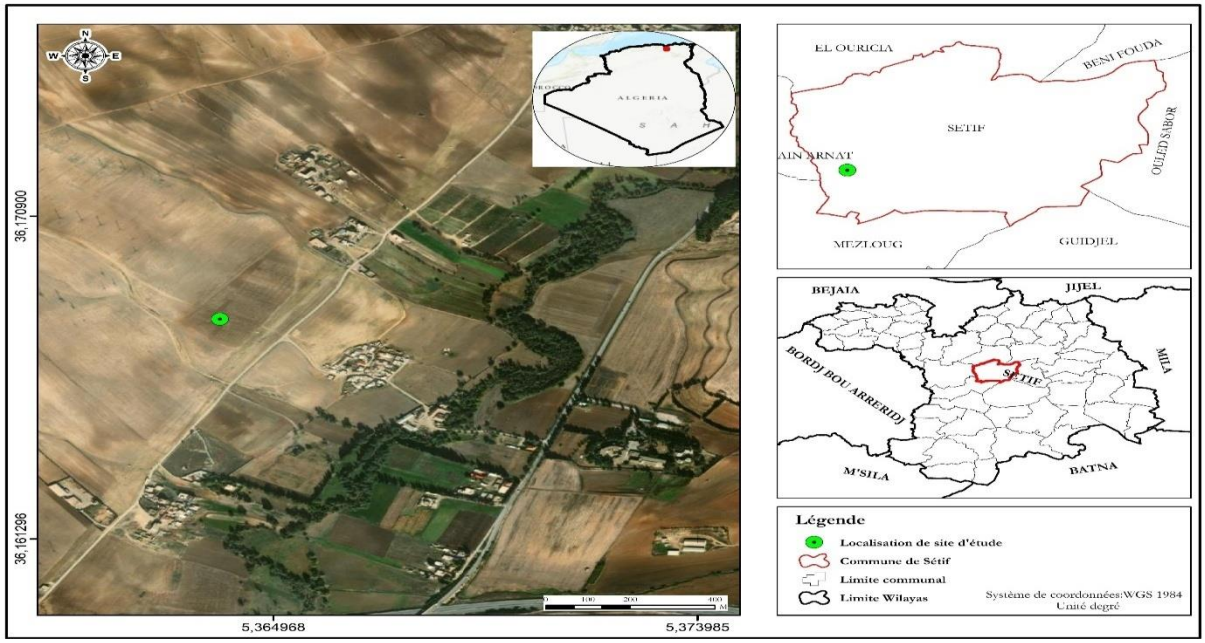


Figure 8 : Situation géographique de la zone d'étude

1. Choix du modèle de culture

Divers facteurs sont mobilisés afin de déterminer le modèle approprié pour une recherche spécifique. Cette sélection se fonde principalement sur l'objectif de la modélisation, la pertinence du modèle pour atteindre cet objectif, ainsi que sur son domaine d'application. Le modèle doit illustrer les processus centraux qui influencent les variables d'intérêt. Ultérieurement, il s'avère indispensable de prendre en compte la facilité d'utilisation d'un modèle établi. Plus l'utilisateur final maîtrise les formalismes du modèle et leur organisation, plus sa capacité à les exploiter s'en trouvera accrue. Généralement, l'évaluation des performances d'un modèle s'effectue à partir d'indicateurs tels que l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE), l'efficience et le biais (Wallach et al., 2011).

1.1 Aquacrop Model

1. 1.1 Description

Aquacrop est un modèle de productivité hydrique des cultures qui a été développé par la Division des terres et de l'eau de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (Dubey et Sharma, 2018). En comparaison avec d'autres modèles, celui-ci se révèle plus efficient dans les zones où le coût de l'eau constitue un facteur limitatif, requiert une quantité moindre de paramètres, se montre plus accessible à l'utilisateur, affiche une précision accrue et présente une probabilité d'écart réduite (Chisanga et al., 2022).

Le modèle AquaCrop se distingue par sa précision comparativement aux modèles concurrents, et il a été employé pour prédire avec exactitude la couverture du couvert végétal (CC), la biomasse, le rendement, la teneur en eau du sol, l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) et la production d'eau (WP). Ceci est valable pour le blé (Shao et al., 2009 ; Andarzian et al., 2011 ; Mkhabela et al., 2012 ; Iqbal et al., 2014), le maïs (Hsiao et al., 2009 ; Leekheng et al., 2009 ; Stricevic et al., 2011 ; Mhizha et al., 2014), la betterave à sucre (Stricevic et al., 2011), le tournesol (Stricevic et al., 2011), la pomme de terre (De la casa et al., 2013), le coton (Hussein et al., 2011), le riz (Maniruzzaman et al., 2015) et la patate douce (Rankine et al., 2015).

En outre, le modèle AquaCrop permet de prédire la réaction des cultures de graminées à l'apport hydrique (Heng et al., 2009 ; Vanuytrecht et al., 2014). AquaCrop a été évalué pour diverses cultures dans un éventail de conditions environnementales (Heng et al., 2009 ; Todorovic et al., 2009 ; Araya et al., 2010 ; Zeleke et al., 2011 ; Amoah et al., 2013 ; Ahmadi et al., 2015 ; Trombetta et al., 2016 ; Toumi et al., 2016). AquaCrop opère une distinction entre les paramètres dits conservatifs, qui sont considérés comme établis, et les paramètres dits non conservatifs, qui sont spécifiques. Ni le site géographique, ni les pratiques de gestion à l'échelle de la parcelle, ni la durée ne modifient les paramètres conservatoires. Ces paramètres, établis à partir de données acquises dans des conditions optimales et exemptes de limitations, demeurent applicables en situation de stress en modulant leurs fonctions de réponse au stress (Steduto et al., 2009 ; Raes et al., 2009). Il est communément admis que ces paramètres sont susceptibles d'être employés dans des conditions variées et ne présentent pas de spécificité quant à un cultivar particulier (Steduto et al., 2012). Par ailleurs, les paramètres non conservatifs impliquent une modification des conditions environnementales, notamment : la densité de plantation, les conditions phénologiques, les périodes nécessaires pour atteindre les phases

végétatives significatives de la culture : l'apparition, la végétation maximale, la floraison, la sénescence et la maturité physiologique.

Le climat, l'itinéraire technique et les propriétés intrinsèques des sols exercent une influence sur d'autres paramètres non conservatifs.

D'après Raes et al. (2009), il est impératif que l'opérateur procède à leur correction ; et en cas d'indisponibilité, leur estimation pourra être effectuée au moyen du modèle.

1.1.2 Données d'entrées du modèle Aquacrop

1 .1.2.1 Données climatiques observé

Les données climatiques quotidiennes de température maximale et minimale (Tmax et Tmin, en °C), de précipitations (P, en mm), de vitesse du vent (V, en m/s), d'humidité relative (Hr, en %), et de durée d'insolation (S, en heures) couvrent la période 2021–2024 et proviennent du site Ogimet (https://www.ogimet.com/metars.phtml.en). Ces données ont été introduites dans le 'climat' du modèle AquaCrop.

Les valeurs de l'évapotranspiration de référence (ET_0) ont été préalablement calculées à l'aide du logiciel CROPWAT (version 8). Ce calcul a nécessité l'utilisation des observations de température maximale et minimale (°C), de la vitesse du vent (m/s), de l'humidité relative (%), et de la durée d'ensoleillement (heures).

Par ailleurs, le modèle AquaCrop (version 8) requiert la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone [CO_2] pour la simulation des rendements. Les valeurs annuelles moyennes globales de [CO_2], issues de l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï), sont incluses dans le package d'AquaCrop et ont été utilisées dans la présente simulation.

1.1.2.2 Données du sol

Les caractéristiques du sol ont été déterminées par des analyses effectuées en laboratoire. Le sol présente une texture limono-argileuse, avec une teneur en matière organique atteignant 2,5 %, une proportion de 40.12 % d'argile, 30.68 % de limon et 29.2 % de sable. La capacité au champ est de 33,9 %, tandis que le point de flétrissement est de 14,56 %. Le pH mesuré est de 7,51, la densité apparente est de 1,32 kg/m³, et la conductivité électrique est de 0,15 ms/cm (Tableau 1).

La mesure de l'humidité du sol (SWC) a évolué au fil du temps et est actuellement réalisée à l'aide d'une tarière métallique, avec trois répétitions (Figure 9), selon la méthode gravimétrique, pour chacune des trois saisons étudiées.

Tableau 1: Les paramètres physico-chimique de site expérimental (ITGC)

Type d'analyse	Paramètres	Résultat	Méthode
granulométrique	Argile %	40.12	Pipette de Robinson
	Limon %	30.68	
	Sable %	29.2	
Hydrique	Point de flétrissement permanent %	33.9	La plaque de pression de Richard
	Capacité au champ %	14,56	
Chimique	Calcaire %	37	JORET-HEBERT
	pH	7.60	pH métré
	Conductivité électrique ms/cm	0.15	Conductimètre
Physique	Densité apparente g/cm^3	1.32	Cylindre volumétrique
Biochimique	Matière organique %	2.5	MO = C% × 1.72



Figure 9 : mesure de l'humidité du sol à l'aide d'une tarière et séchage dans l'étuve à température de 105C° (Source : Chetioui,2023)

1.1.2.3 Données culturales

La biomasse aérienne sèche produite par unité de surface est obtenue à partir du fauchage de la partie aérienne des deux espèces de blé cultivés : blé dur EL oued lberd *(Triticum durum Desf)* et blé tendre El Wifek *(Triticum aestivum L)* sur une micro-parcelle de 0,25 m² (Figure 10). Les échantillons récoltés sont ensuite séchés à une température de 105 °C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'un poids constant, conformément à la méthode décrite par Raes (2015) (Figure 10). Enfin, le poids mesuré est multiplié par quatre pour l'obtenir dans 1m². Pour englober une variété plus large de scénarios de croissance végétale, six collectes de données ont été effectuées à diverses phases de croissance du blé dur et tendre, y compris l'initiation du tallage, le tallage complet, la montaison, l'épiaison, la floraison et la phase de lacté (stade laiteux). Quatre points différents ont été sélectionnés pour échantillonner chaque culture.

Le taux de couverture de la canopée (CC) est déterminé à l'aide de l'application Canopeo (https://canopeoapp.com)(Figure 11). Le développement de cette application comme outil de détection à distance pour la mesure de la fraction du sol couverte par la végétation offre aux agriculteurs et chercheurs un instrument précis, simple et économique pour le suivi de la santé et du développement des cultures tout au long de leur cycle de croissance (Hale et al., 2023).



Figure 10: Mesure de la biomasse dans une superficie de¼ m² et séchage dans l'étuve à température de 105C° (Source : Chetioui, 2023)



Figure 11: Le taux de couverture de la canopée (CC) en utilisant l'application Canopeo (Source : Chetioui, 2023)

1.1.2.4 Données de calcul de l'évapotranspiration de référence ETo

Pour le calcul de l'évapotranspiration, on utilise la méthode FAO Penman-Monteith car elle est recommandée comme la seule méthode standard pour calculer l'évaporation de référence. La méthode FAO Penman Monteith nécessite des données sur la radiation, la température de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Cette méthode est importante elle est utilisée par les scientifiques pour évaluer l'évaporation des plantes, le CWR et la planification des irrigations (Roja *et al.,* 2020).

On peut déduire la méthode FAO Penman-Monteith pour estimer ETo comme suit (Allen *et al.,* 1998) :

$$ETO = \frac{0.408*\Delta*(R\,n - G) + \gamma * (900\,T + 273) * U\,2 * e\,s - e\,a}{\Delta + (1 + 0.34 * U\,2)}$$

Avec

ETo : Évapotranspiration de référence (mm/jour)

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C)

Rn : Radiation nette à la surface des cultures (MJ/m²/jour)

G : Densité du flux thermique du sol (MJ/m²/jour)

γ : Constante psychométrique (kPa/°C)

T : Température moyenne quotidienne de l'air à 2 m d'altitude (°C)

U2 : Vitesse du vent à 2 mètres de hauteur (en m/s)

es : Saturation pression de vapeur (kPa)

ea : Pression de vapeur réelle (kPa).

1.2 Calibration du modèle Aquacrop

Le modèle Aquacrop a été calibré pour les cultivars Oued el bared et El Wifek pour trois saisons culturales successives 2021-2022, 2022-2023, 2023-2024 à L'ITGC à Sétif. En utilisant les données présentées les tableaux 1, 2 et 3. Selon les concepteurs du modèle, la majorité des paramètres considérés comme non-conservatives sont déterminés par le milieu de culture et les méthodes de culture. Ces paramètres comprennent la densité des semis, la longueur de la levée, la zone de couverture optimale des feuilles, la profondeur maximale des racines, la période de floraison, la formation des graines et la maturité. La simulation utilise 4 catégories de données d'entrée : le climat, la culture comprenant les étapes phénologiques, les caractéristiques physico-chimiques du sol et gestion du champ pour obtenir des valeurs comme sa teneur en eau à 0,2 m de profondeur (SWC en pourcentage vol), la production de biomasse (B en tonnes par hectare) et le pourcentage de couvertures de la canopée (CC).

1.3 Validation du modèle Aquacrop

Avant de procéder à la simulation des productions futures de blé, le modèle AquaCrop a d'abord été validé en se basant sur les valeurs simulées et observées de rendement, de productivité en eau et de biomasse au cours des trois campagnes agricoles étudiées. Il est à noter que les paramètres de culture non conservatifs relatifs aux éspèces d'El Wifek (Tableau 2) et d'Oued El Bared (Tableau 3) ont été ajustés à plusieurs reprises afin d'obtenir des rendements en grains et en biomasse proches des valeurs observées durant ces trois années. Ces paramètres calibrés ont ensuite été appliqués à l'ensemble des simulations réalisées avec AquaCrop pour les deux horizons temporels considérés et sous les différents scénarios climatiques SSP.

Tableau 2 : valeurs des paramètres conservatifs et non conservatifs (calibrés et observés) du blé tendre sur Aquacrop

Paramètres	Saison 1	Saison 2	Saison3	Source
Température de base (C°)	0	0	0	Conservée
Température maximale (C°)	26	26	26	Conservée
Nombre de plants à l'hectare (plants /m²)	340	300	320	Observée
Couvert végétal initial (CCo) %	0.70	0.30	3.30	Observée
Couvert végétal maximal (CCx) %	85	70	72	Observée
Productivité de l'eau (WP*) (gram /m²)	17	17	17	Conservé
Profendeur d'enracinement effective maximale(m)	0.60	1.1	1.1	Calibré
Cofficient cultural maximal (m)	1.10	1.10	1.10	Conservé
Teneur en eau du rendement frais %	15	15	15	Calibré
Durée du semis à l'émergence (jours)	14	7	7	Observée
Durée du semis à la floraison (jours)	108	100	130	Observée
Durée du semis à la maturité physiologique (jours)	174	175	177	Observée
Durée du semis au début de la sénescence (jours)	144	140	140	Observée
La durée pour atteindre la (CCx) (jours)	75	98	80	Observée
La durée pour atteindre la profondeur racinaire maximale (jours)	79	80	80	Calibrée
Indice de récolte de référence (HIo) (%)	50	50	50	Calibré

Tableau 3: valeurs des paramètres conservatifs et non conservatifs (calibrés et observés) du blé dur sur Aquacrop

Paramètres	Saison 1	Saison 2	Saison3	Source
Température de base (C°)	0	0	0	Conservée
Température maximale (C°)	26	26	26	Conservée
Nombre de plants à l'hectare (plants /m²)	240	200	220	Observée
Couvert végétal initial (CCo) %	1.50	0.10	1.20	Observée
Couvert végétal maximal (CCx) %	80	70	73	Observée
Productivité de l'eau (WP*) (gram /m²)	17	17	17	Conservé
Profondeur d'enracinement effective maximale(m)	1.1	1.1	1.1	Calibré
Coefficient cultural maximal (m)	1.10	1.10	1.10	Conservé
Teneur en eau du rendement frais %	15	15	15	Calibré
Durée du semis à l'émergence (jours)	7	7	13	Observée
Durée du semis à la floraison (jours)	116	107	130	Observée
Durée du semis à la maturité physiologique (jours)	193	190	197	Observée
Durée du semis au début de la sénescence (jours)	155	150	166	Observée
La durée pour atteindre la max (CCx) (jours)	85	85	96	Observée
La durée pour atteindre la profondeur racinaire maximale (jours)	85	85	96	Calibré
Indice de récolte de référence (HIo) (%)	50	50	50	Calibré

1. 4 Évaluation du modèle

L'évaluation de la performance du modèle a été réalisée à l'aide de plusieurs indicateurs statistiques couramment utilisés dans la modélisation agro-climatique. Ces indicateurs comprennent : Le coefficient de corrélation de Pearson (R), l'indice d'accord de Willmott (d), ainsi que les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) et normalisées (NRMSE). Selon Willmott (1984) et Legates et McCabe (1999), les indicateurs NRMSE et d sont particulièrement recommandés pour comparer la qualité des simulations entre différents modèles ou jeux de données.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Si - Oi)^2}$$

Où :

i correspond au nombre d'observations, tandis que Si et Oi désignent respectivement les valeurs simulées et mesurée. Lorsque RMSE est proche de zéro, un ajustement du modèle est effectué. L'unité de RMSE est identique à celle de Si et Oi (Abedinpour., 2014).

$$\text{NRMSE} = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100$$

Avec $\bar{O}$ comme moyenne des observations. Selon (Amiri,2016), la précision du modèle est excellente si le NRMSE est inférieur à 10%, satisfaisante si le NRMSE se situe entre 10% et 20%, acceptable si le NRMSE se situe entre 20% et 30%, et modérée si elle dépasse 30%.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{O_i}| + |Oi - \bar{O_i}|)^2}$$

La valeur de l'indice d'accord (d) varie entre 0 et +1 (Andarzian *et al* 2011 ; Tavakoli *et al* 2015 ; Mohammadi *et al* 2016). D'après les valeurs de d, la proximité avec une indique que les valeurs estimées et observées sont identiques.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \Sigma (y_i - \bar{y})^2}}$$

Dans le test Pearson, ils varient comme suit : -1 de 0 à 1. Les valeurs positives de r signalent une corrélation linéaire positive, tandis que les valeurs négatives indiquent une corrélation

linéaire négative. Si r est négatif, cela signifie qu'il n'y a pas de correlation linéaire ; tandis que si r est proche de 1 ou -1, la correlation linéaire est forte (Gray et Kinnear,2012).

Remarque

Certaines analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le programme IBM SPSS Statistics. Un test d'analyse de variance (ANOVA) a été réalisé pour étudier l'influence des scénarios climatiques et des horizons temporels sur les divers paramètres examinés. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes auxquelles sont associés des intervalles de confiance à 95%, ce qui permet de saisir la variation et la précision des estimations. Les graphes ont été conçus en utilisant le logiciel OriginPro 2024.

2. Données climatiques historiques et futures

Les données historiques (1995-2014 annuelles et mensuelles) relatives aux paramètres climatiques tels que la température moyenne, maximale, minimale, les précipitations et l'humidité relative ainsi que l'ET0 (Tmax, Tmin, Hr) sont recueillies sur le site https://climateknowledgeportal.worldbank.org/.

Les données climatiques futures ont été simulées à l'aide de données téléchargées depuis la plateforme de la banque mondiale (https://climateknowledgeportal.worldbank.org/). Dans le but d'anticiper l'évolution future des températures et des précipitations dans la zone d'étude, les trois scénarios de simulation climatique, désignés par l'acronyme SSPs (Scénarios Socio-économiques Partagés) (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5), ont été mis en œuvre sur deux horizons temporels : le court terme (2030), le moyen terme (2050) e. Un nombre significatif de modèles issus du sixième cycle du « Coupled Model Intercomparion Project » (CMIP6) ont reproduit avec succès le phénomène de diminution des précipitations projetées et d'augmentation de la température dans la zone d'étude, tandis que certains modèles ont présenté des résultats divergents (Tableau 4). Un gradient de sécheresse, variant de zéro à 32 millimètres par mois, a été constaté dans la plupart des modèles du Projet d'inter comparaison de modèles couplés Phase 6 (CMIP6) concernant l'Afrique du Nord (Babaousmail et al., 2021).

Les projections climatiques m'enselles pour Tmax, Tmin et Hr correspondant aux horizons 2030–2050 sont obtenu à partir du (https://climateknowldgeportal.worldbank.org./).Puis ont été introduites dans CROPWAT afin de calculer les futures valeurs mensuelles de l'ET_0.

Les concentrations moyennes annuelles projetées de [CO_2] pour les périodes futures (2030, 2050), sous les trois scénarios SSP, sont également incluses dans le package d'AquaCrop.

La vitesse du vent et rayonnement solaires sont obtenue à partir de https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6/

3. Description des modèles climatiques

Les critères suivants ont été utilisés comme base pour sélectionner des modèles climatiques : être un modèle vérifié par l'IPCC, ce qui signifie qu'il est basé sur une simulation de plusieurs dizaines d'années (un modèle stable) et posséder un modèle climatique à trois dimensions liées à l'océan et à l'atmosphère grâce au projet d'inter-comparions couplé à six phases (ONeill et al.,2017) .

Tableau 4: Modèles de circulation générale utilisés pour les scénarios SSPs (ONeill et al., 2017)

Model Name	Modeling Center	Responsible Institution
CAMS-CSM1-0	CAMS	Chinese Academy of Meteorological Sciences
CANESM5	CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS	Centre National de Recherches Météorologiques / CentreEuropéen de Recherche et Formation Avancées en CalculScientifique
EC-EARTH3-VEG	EC-Earth-Consortium	EC-Earth-Consortium: La Agencia Estatal de Meteorologja (AEMET), Barcelona Supercomputing Centre (BSC), Institute of Atmospheric Sciences and Climate (CNR-ISAC), Danish Meteorological Institute (DMI), Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Finnish Meteorological Institute (FMI), Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (Geomar), Irish Centre for High-End Computing (ICHEC), International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Instituto Dom Luiz (IDL), Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU), Portuguese Institute for Sea and Atmosphere (IPMA), KIT Karlsruhe Institute of Technology, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), Lund University, Met Eireann, The Netherlands eScience Center (NLeSC), Norwegian University of Science and Technology (NTNU), University of Oxford, SURFsara, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Stockholm University, Unite ASTR, University College Dublin, University of Bergen, University of Copenhagen, University of Helsinki, University of Santiago de Compostela, Uppsala University, University of Utrecht, Vrije Universiteit Amsterdam andWageningen University.
FGOALS-G3	CAS	China Academy of Sciences
GFDL_ESM4	NOAA GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
IPSL_CM6A_LR	IPSL	The Institute Pierre Simon Laplace
MIROC-ES2I	MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), Center for Climate system Research
MIROC6	MIROC	- National Institute for Environmental Studies
MRI-ESM2	MRI	Meteorological Research Institute
UKESM1-0-II	MOHC NERC NIMS-KMA NIWA	National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration-Climate Research Division

6.1 Correction des biais des projections climatiques futures

Les données climatiques historiques et futures moyennes ont été extraites du portail de connaissances sur le changement climatique (Climate Change Knowledge Portal, CCKP) de la banque mondiale (https://climateknowledgeportal.worldbank.org/metadata).Les

projections CMIP6 disponible sur cette plateforme ont été préalablement soumises à une procédure de correction des biais et de désagrégation spatiale (BCSD) basée sur la méthode du quantile mapping , afin d'obtenir des données à une résolution spatiale de 0,25° ×0,25°. Tandis que, les données de vitesse du vent (sfcWind) et du rayonnement solaire (rsds) ont été obtenues à partir de la base de données NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6), qui fournit des projections climatiques CMIP6 corrigées du biais et spatialement désagrégées à une résolution de 0,25° (https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6).

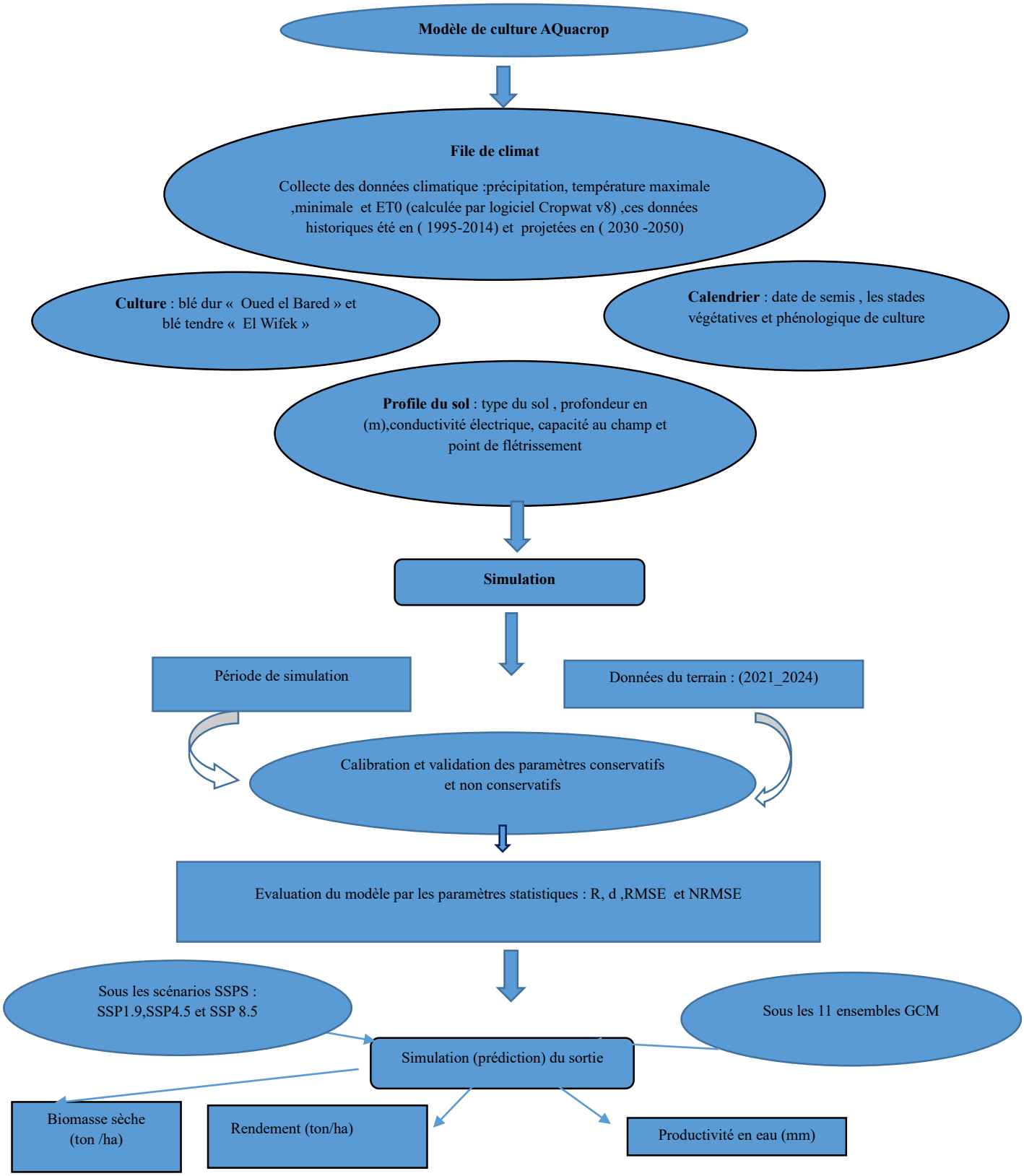


Figure 12: Méthodologie de prévision des rendements, biomasse, couverture de la canopée du blé et productivité en eau avec logiciel AQuacrop

Partie 3 : Résultats et Discussion

Chapitre I : Examen du climat récemment observé et des changements climatiques futurs prévisibles à Sétif

1 Introduction

Dans ce chapitre, on compare les moyennes annuelles et mensuelles de paramètres climatiques tels que précipitation (mm), Température maximale, Température minimale et température moyenne (C°), humidité relative (%), Vent (m /s), Rayonnement (Mj/m²) et évapotranspiration(mm) enregistrés durant la période de référence (1995-2014) à celles prévues sous tous les scénarios futurs SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5 et les deux horizons (2030 et 2050).

2 A l'échelle annuelle

2.1 Précipitations

Les figures illustrent l'évolution des précipitations annuelles moyennes (en mm) projetée pour les horizons 2030 et 2050 à Sétif, selon différents scénarios climatiques SSP, et comparée à la période de référence (PR = 1995–2014). Pour la période de référence, la moyenne des précipita-tions est d'environ 525 mm/an. À l'horizon 2030, les projections indiquent une légère diminu-tion des précipitations sous le scénario SSP1-1.9 (≈ 499 mm/an, soit –6 %), une stabilité relative sous SSP4-4.5 (≈ 501 mm/an, soit –5 %), et une réduction plus marquée sous SSP5-8.5 (≈ 494 mm/an, soit –6 %).À l'horizon 2050, la tendance à la baisse des précipitations se poursuit de manière progressive et constante avec l'intensification des scénarios climatiques : une diminu-tion d'environ 11 % sous SSP1-1.9, 16 % sous SSP4-4.5, et jusqu'à 22 % sous SSP5-8.5, comme l'illustre la figure 13.

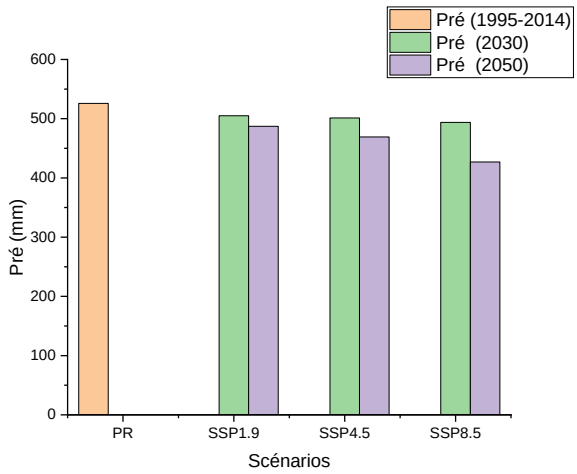


Figure13 : Comparaison des précipitations entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.2 Température

2.2.1 Température maximale

La figure 14 établit une comparaison entre les températures maximales annuelles relevées durant la période de référence et celles projetées par les scénarios SSP pour l'année 20230. Au cours de la période considérée, les données révèlent des variations naturelles des températures maximales. Dans le scénario SSP1-1.9, il est observé une faible augmentation des températures maximales annuelles (+1,5 à +1,8), indiquant le début d'une détérioration des conditions thermiques. Dans le scénario SSP5-8.5, l'élévation thermique est plus modérée (de +1,0 à +1,2 °C), les températures maximales demeurant voisines de la période de référence. Tmax pour l'année 2030 : environ 22,8 °C. À l'horizon 2050, les courbes présentées révèlent des augmentations significatives comparativement à celles illustrées à la figure 15. Dans le scénario SSP5-8.5, une augmentation significative de la température maximale annuelle moyenne est observée (+2,8 à +3,2), suggérant des conditions thermiques extrêmes. Dans le scénario SSP1-1.9, les accroissements sont de moindre ampleur (+1,7), mais les températures maximales annuelles excèdent toujours la période de référence. Les résultats obtenus mettent en évidence l'incidence des scénarios d'émissions sur les températures maximales prévues à l'horizon 2050.

T maximum 2050 : environ 24,2 °C. L'augmentation annuelle moyenne s'élève à +1,4 °C entre les deux périodes considérées.

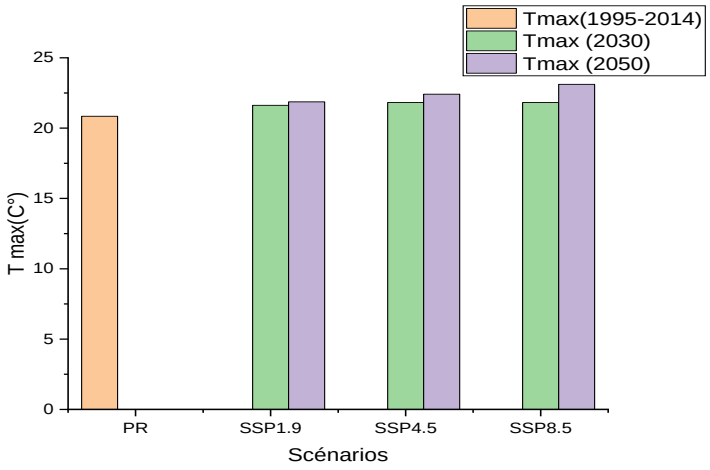


Figure 14 : Comparaison des températures maximales entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.2.2 Température minimale

Les données mettent en évidence des variations naturelles des températures minimales annuelles. Dans le scénario SSP5-8.5, les courbes révèlent une élévation de la température minimale annuelle moyenne de +1,2 à +1,5, ce qui témoigne d'un amorçage du réchauffement climatique. Dans le scénario SSP1-1.9, l'élévation thermique est atténuée, les températures minimales se maintenant à des valeurs voisines des niveaux de la période de référence, soit +0,8 à +1,0. Ces disparités mettent en évidence l'incidence des scénarios d'émissions sur les températures minimales à l'horizon 2030. En 2050, la température minimale annuelle selon le scénario SSP1-1.9 s'établira à +1,5 °C, tandis que le scénario SSP5-8.5 prévoit une augmentation de +2,0 °C à +2,5 °C (figure 15).

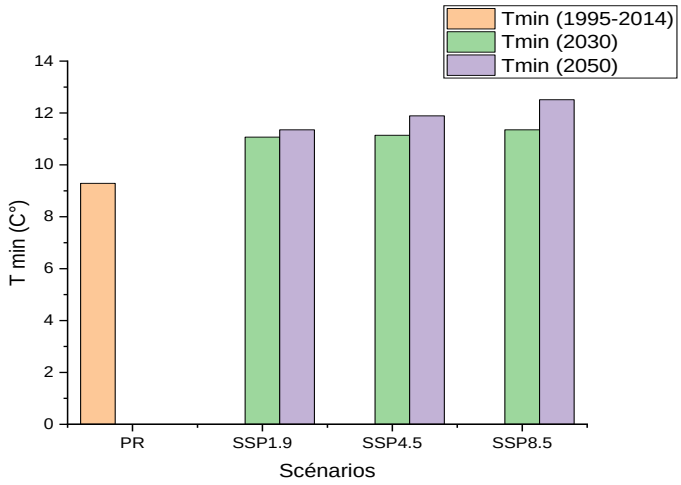


Figure 15 : Comparaison des températures minimales entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.2.3 Température moyennes

Il est observé une augmentation significative de la température moyenne entre la période de (PR) et le scénario SSP1-1.9, de l'ordre de +2,8 °C. Subséquemment, une augmentation modérée de la température est observée entre les scénarios SSP1-1.9 et SSP2-4.5 (+ 0,2). Dans le continuum allant de SSP2-4.5 à SSP5-8.5, une augmentation modérée est observée, signalant une élévation restreinte dans cette configuration spécifique. De manière générale, l'ensemble des scénarios SSP indique une élévation de (T moy) comparativement à la PR. Concernant l'horizon temporel de 2050, il convient de considérer la (PR). La température moyenne constatée s'élève

approximativement à 14,8 °C. Scénario SSP1-1.9 (faible teneur en carbone) : La température s'élève à environ 18,0 °C, ce qui représente une augmentation de 3,2 °C par rapport à la période de référence. Scénario SSP2-4.5 (intermédiaire) : La température s'élève à 18,6 °C, ce qui représente une augmentation de 3,8 °C. Scénario SSP5-8.5 (haut carbone) : La température moyenne s'élève à 19,3 °C, soit une augmentation de 4,5 °C par rapport à la (PR) (figure 16).

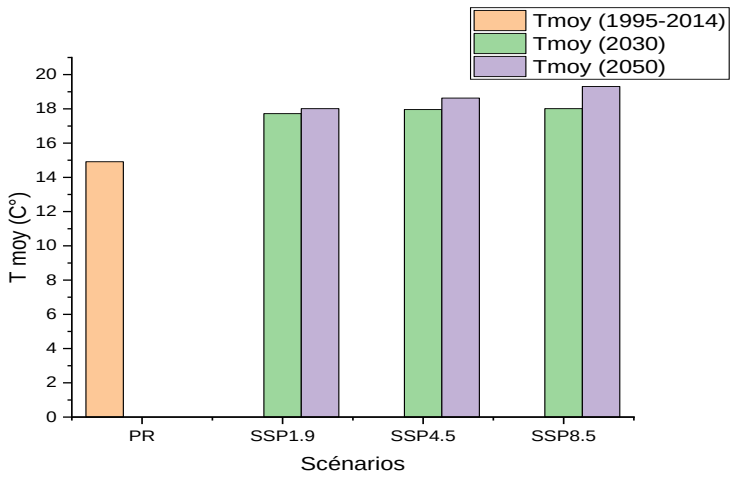


Figure 16: Comparaison des températures moyennes entre la période de référence et les scénarios ssps projeté en 2030 et 2050

2.3 Humidité relative

L'humidité relative de la période de référence, la plus élevée s'établit aux environs de 76 %, suggérant un paléoclimat relativement humide. Selon le scénario SSP1.9, une diminution significative de l'humidité est observée, atteignant environ 63,5 %. En comparaison, le scénario SSP4.5 révèle une légère augmentation, s'établissant à environ 64 % par rapport au scénario SSP1.9. Une diminution supplémentaire de l'humidité relative à environ 63 % est observée comparativement au scénario SSP8.5 (voir figure 17). Dans tous les scénarios envisagés, l'humidité relative diminue significativement comparativement à la (PR). Il en ressort une tendance à l'aridification du climat à Sétif à l'horizon 2050. Le scénario SSP1-1.9, qui représente une maîtrise optimale des émissions, présente la valeur minimale la plus faible, bien que l'écart avec les scénarios SSP4.5 et SSP8.5 demeure limité (environ 2 %). Plus le scénario envisagé est pessimiste (SSP5-8.5), plus l'humidité relative tend à diminuer.

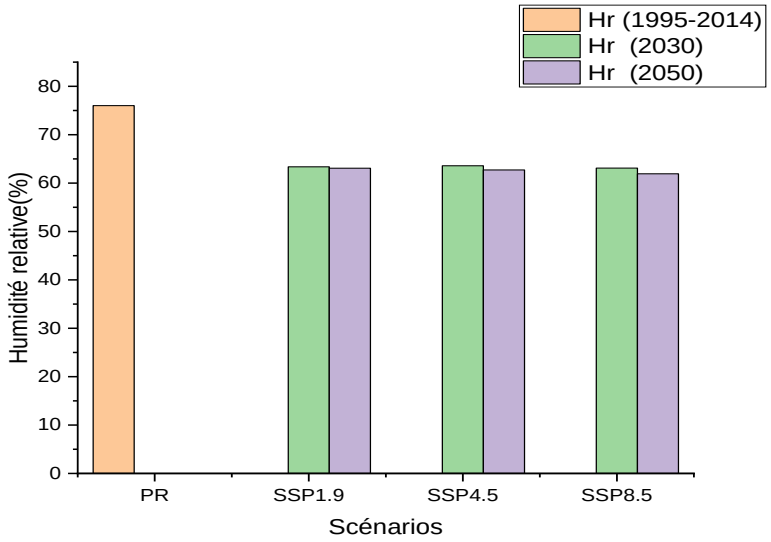


Figure 17 : Comparaison de l'humidité relative (%) entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030

2.4 Vitesse du vent

La vitesse moyenne annuelle du vent de la période de référence est d'approximativement 2,85 m/s. Cette vitesse atteignant approximativement 3,4 m/s, ce qui suggère une intensification du vent dans le cadre du scénario climatique SSP1.9. Par ailleurs, il est à noter que la vélocité du vent poursuit son ascension jusqu'à une valeur de 3,6 m/s, ce qui témoigne d'une amplification graduelle des régimes éoliens dans le cadre d'un scénario intermédiaire. Scénario socio-économique partagé 4.5. Dans le cadre du scénario SSP5-8.5 : Le scénario le plus extrême révèle l'augmentation la plus marquée, avec une vélocité annuelle moyenne atteignant près de 3,8 m/s, ce qui suggère un accroissement significatif de la dynamique atmosphérique en réponse à un réchauffement climatique intensifié.

Cette évolution, présentant une approximation de linéarité concernant la vitesse du vent entre la (PR) et les projections futures, suggère une augmentation de l'énergie éolienne potentiellement disponible dans la région de Sétif à l'horizon 2030, impliquant des conséquences à la fois favorables (accroissement du potentiel énergétique) et défavorables (érosion, évapotranspiration, contraintes sur les cultures). En outre, la vitesse moyenne du vent s'est établie à approximativement 2,8 m/s durant la période de référence. Dans le cadre du scénario SSP 1.9, un modèle optimiste de développement

durable caractérisé par de faibles émissions, la vitesse moyenne du vent s'accroît pour atteindre approximativement 3,6 m/s. Le scénario intermédiaire SSP 4.5 fait état d'une augmentation additionnelle de la vitesse du vent, atteignant approximativement 3,8 m/s. Dans le cadre du scénario de fortes émissions SSP8.5, la vitesse moyenne du vent s'accroît pour atteindre approximativement 4,0 m/s (figure 18). Par conséquent, une augmentation graduelle de la vitesse moyenne du vent est observée, s'échelonnant du scénario le plus optimiste (SSP1-1.9) au plus pessimiste (SSP5-8.5).

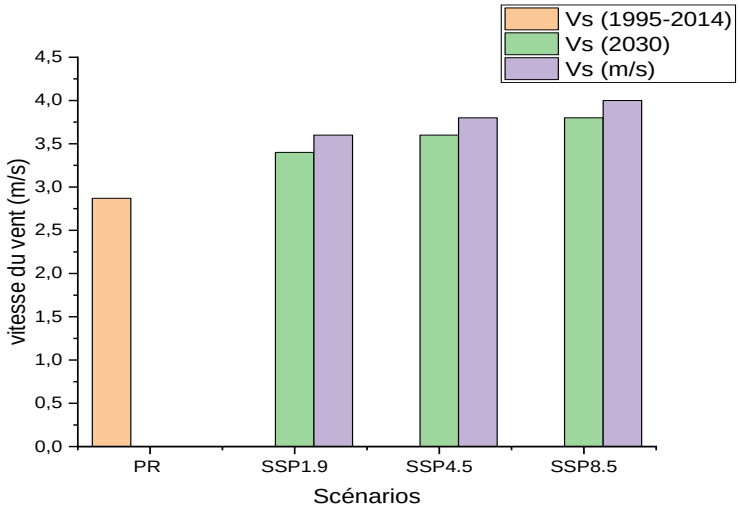


Figure 18 : Comparaison des vitesses moyennes du vent entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.5 Rayonnement solaire

Il est attendu une augmentation du rayonnement solaire à Sétif en 2030 comparativement à la période de référence. On observe une légère augmentation de l'irradiante solaire d'environ 20 mégajoules par mètre carré (MJ/m²) entre la période de référence (PR) et SSP1-1.9. Une augmentation modérée d'environ vingt mégajoules par mètre carré (MJ/m²) entre les scénarios SSP1-1.9 et SSP2-4.5, et une augmentation supplémentaire d'environ trente mégajoules par mètre carré (MJ/m²) entre les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (figure 26). Il est à noter que, avec une énergie solaire incidente d'environ 1475 MJ/m² pour la période de référence (PR), d'environ 1520 MJ/m² pour le scénario SSP1-1.9, d'environ 1540 MJ/m² pour le scénario SSP2-4.5 et d'environ 1560 MJ/m² pour le scénario SSP5-8.5, l'accroissement entre la période de référence

et le scénario SSP5-8.5 s'élève approximativement à +85 MJ/m², ce qui constitue une augmentation significative de l'énergie solaire disponible d'ici à 2050 (figure 19).

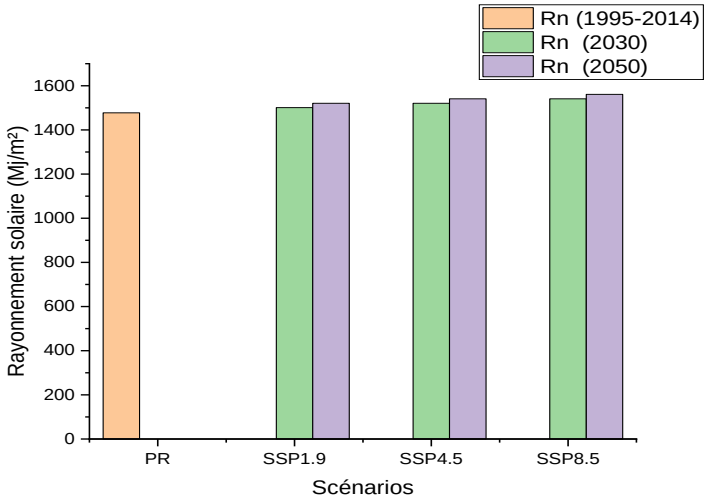


Figure 19 : Comparaison des rayonnements solaires entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.6 Évapotranspiration de référence

À l'horizon 2030, une augmentation progressive de l'évapotranspiration de référence (ET_0) est observée par rapport à la période de référence 1995–2014, dont la valeur moyenne s'établit à environ 1555 mm. Vers les scénarios futurs. Sous SSP1-1.9, l'ET_0 monte à environ 1577 mm. Elle atteint près de 1585 mm sous SSP2-4.5. Finalement, sous SSP5-8.5, l'ET_0 dépasse 1590 mm. D'ici à 2050, selon le scénario SSP1-1.9, l'ET_0 grimpe à approximativement 1554,61 mm.

Sous SSP2-4.5, elle se chiffre à près de 1594,1 mm. Au final, dans le cadre du scénario SSP5-8.5, l'ET_0 excède 1595.1 mm (figure21).

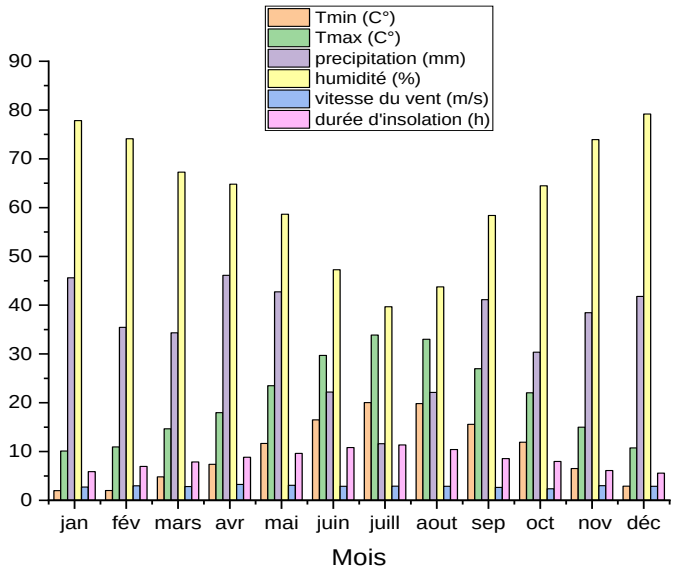


Figure 20 : Evaluations des paramètres climatiques de l'évapotranspiration de référence de période de référence (1995-2014)

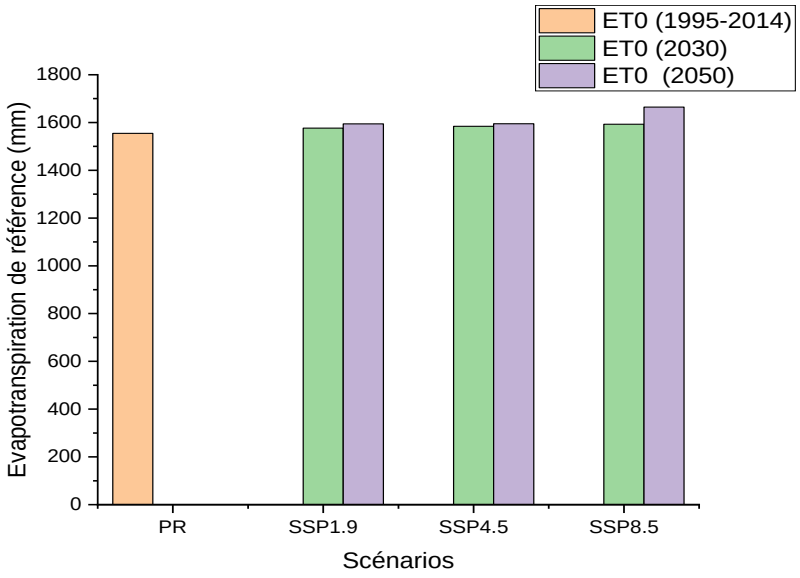


Figure 21: Comparaison de l'évapotranspiration de référence entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.7 Teneurs moyennes en CO_2 dans l'atmosphère terrestre

La concentration moyenne annuelle de CO_2 au cours de la période de référence est évaluée à 380,5 ppm. Il est projeté que cette concentration s'accroîtra respectivement

de +44, +63,5 et +75 ppm à l'horizon 2030, atteignant ainsi 426,5 ppm, 444 ppm et 455,5 ppm, conformément aux trois scénarios respectivement. Pour l'année 2050, les projections suggèrent des concentrations de 433,5 ppm, 518 ppm et 615,5 ppm, ce qui représente une augmentation de 53 ppm, 137,5 ppm et 235 ppm, respectivement, selon les scénarios considérés (figure 22). Les données concernant les concentrations de CO_2 sont accessibles au sein de la base de données intégrée au modèle AquaCrop. Il est important de préciser que les valeurs de dioxyde de carbone (CO_2) relatives à la période de référence (PR) sont issues de mesures continues réalisées à l'observatoire de Mauna Loa, situé à Hawaï, et qu'elles ont été intégrées à cette base de données.

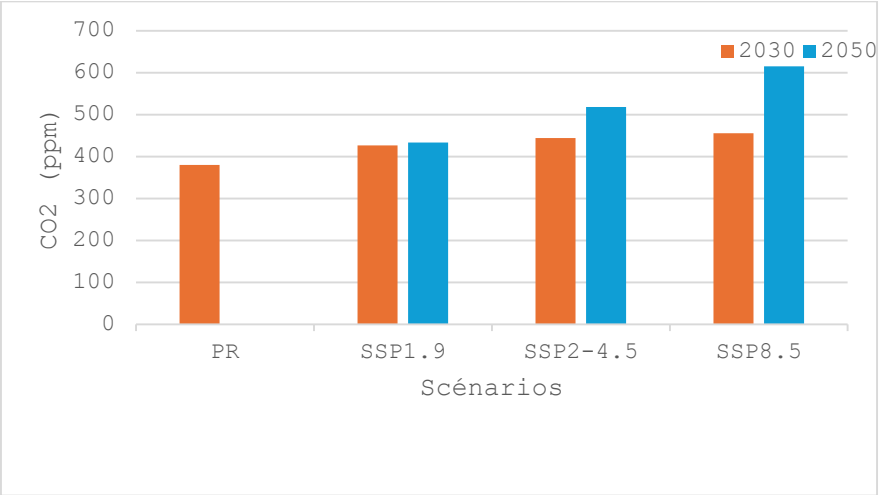


Figure 22 : Comparaison des moyennes des concentrations de [CO2] entre la PR et les trois scénarios prospectifs pour les années 2030 et 2050

3 A l'échelle mensuelle

3.1 Précipitation

Une diminution systématique des précipitations mensuelles est observée en 2050 comparativement à 2030 pour l'ensemble des mois de l'année. Concernant les mois les plus affectés, mars, avril, novembre et décembre présentent une diminution de dix millimètres, ce qui représente une perte approximative de vingt à vingt-cinq pour cent par rapport aux valeurs de référence de deux mille trente. Cette diminution observée en fin et début d'année est susceptible de réduire la durée de la saison des pluies, laquelle est déjà concentrée sur une période limitée. Concernant la période estivale (de juin à août) : Les précipitations y sont actuellement très réduites et présentent une tendance à se raréfier jusqu'à un niveau proche de l'absence. Ces résultats

confirment une intensification de la sécheresse observée pendant la période estivale (figure 23).

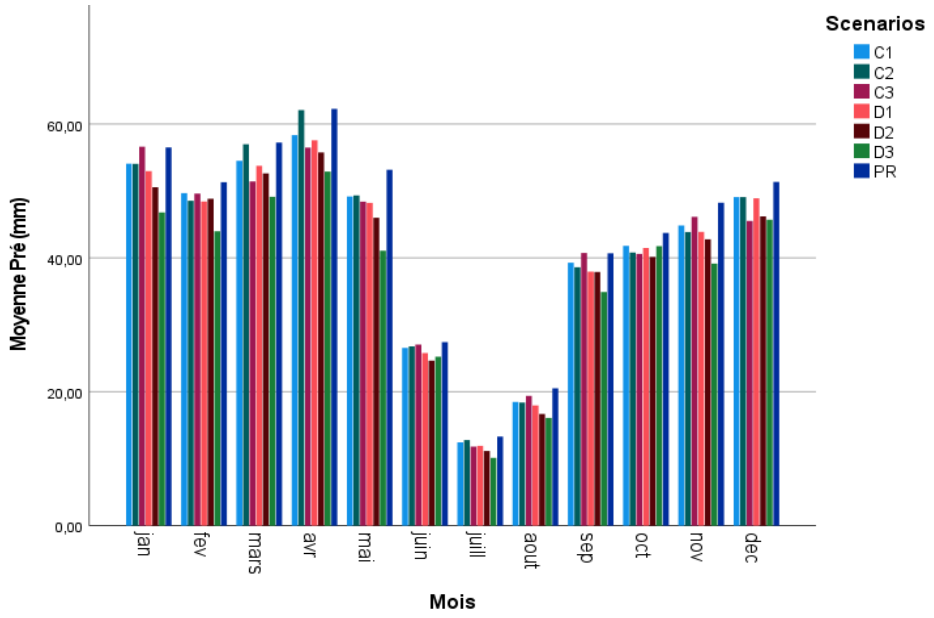


Figure 23 : Comparaison des précipitations mensuelles entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.3 Température

2.3.1 Température moyenne

Dans la perspective temporelle rapprochée de l'année 2030, et plus précisément durant la période de janvier à mars, il est estimé que la température moyenne sous la période de référence (PR) se situe entre six et dix degrés Celsius. Tous les scénarios envisagés indiquent une faible augmentation (environ +1 à +2°C), le scénario SSP5-8.5 se distinguant par la hausse la plus marquée. D'avril à juin, une augmentation progressive est observée. Au cours de la période s'étendant de mai à juin, il est observé une divergence accrue entre les projections climatiques régionales et les scénarios envisagés, atteignant un excédent de température de trois à quatre degrés Celsius, en particulier dans le cadre du scénario SSP5-8.5. Juillet et août, qui constituent la période la plus chaude, connaissent une température moyenne de 27 à 28 °C selon les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5, comparativement à environ 25 °C pour la période de référence, ce qui représente une augmentation de l'ordre de 2 à 3 °C. Septembre à novembre : la

tendance demeure similaire, avec des températures moyennes qui excèdent celles de la période de référence. Un écart significatif, atteignant jusqu'à plus de 2 °C, a été notamment observé au cours du mois de septembre. Décembre : Une diminution des températures est observée, cependant les scénarios SSP demeurent approximativement de +1 à +2°C au-dessus de la période de référence. L'ensemble des scénarios prospectifs indique une exacerbation des températures moyennes, notamment dans le cadre du scénario SSP5-8.5 (figure 24). De janvier à mars, on observe une augmentation des températures variant de +2 à +4 °C, selon le scénario considéré. Le scénario SSP5-8.5 se caractérise par les augmentations les plus significatives, s'élevant à approximativement neuf degrés Celsius en janvier, comparativement à six degrés Celsius dans la PR. D'avril à juin, une augmentation nette et progressive des températures est observée. En juin, il est prévu que la température atteigne environ 25 °C selon le scénario SSP1-1.9 et environ 27 °C selon le scénario SSP5-8.5, comparativement à 22 °C en période de référence, ce qui représente une augmentation de 3 à 5 °C. Juillet et août (période estivale) : La période susmentionnée se caractérise par des températures supérieures à 30 °C, conformément au scénario SSP5-8.5. Des écarts de température de plus quatre à plus cinq degrés Celsius par rapport à la période de référence a été observés. Il est à noter la persistance d'un réchauffement significatif, particulièrement perceptible au cours du mois de septembre (environ +3 °C). En octobre, il est attendu que les températures évoluent d'environ 17°C (RP) à environ 21°C (SSP5-8.5). Une augmentation de température de +2 à +4 °C, selon le scénario envisagé, est anticipée au mois de décembre d'ici à 2050 (figure 24). Par conséquent, En 2050, à Sétif, un accroissement généralisé des températures est attendu sur l'ensemble de l'année, avec des augmentations maximales critiques durant la période estivale. Les scénarios de trajectoires socio-économiques partagées (SSP) indiquent une augmentation de l'intensité du réchauffement en fonction des niveaux d'émissions.

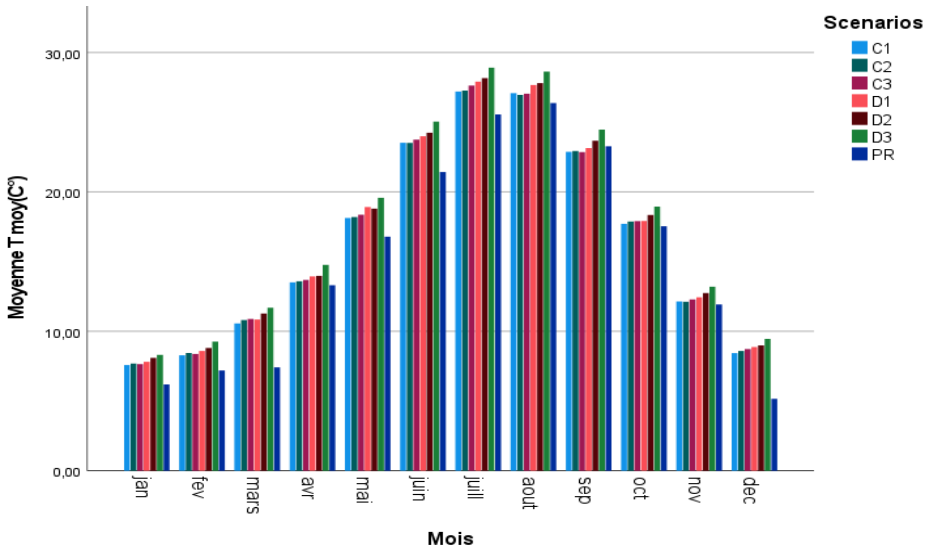


Figure 24 : Comparaison des températures moyennes mensuelles entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.3.2 Température maximale

La figure 25 établit une comparaison des températures maximales mensuelles entre la période de référence et les scénarios SSP (Trajectoires socioéconomique partagée) pour l'horizon 2030. Les températures maximales prévues excèdent les valeurs de la période de référence pour l'ensemble des mois considérés. Le réchauffement climatique est particulièrement notable durant la période hivernale et au commencement du printemps (de janvier à avril). Le scénario SSP5-8.5 présente l'augmentation la plus marquée. En période estivale, même dans le scénario SSP1-1.9, une augmentation des températures est constatée comparativement au climat actuel. Il est observé une augmentation des températures maximales de deux à trois degrés Celsius comparativement à la période de référence durant les mois de janvier, février et décembre. Un écart significatif par rapport à la période de référence, de l'ordre de +2 °C pour les mois de mars, avril et mai, indique un printemps plus chaud et un début plus précoce de la saison chaude. Les températures maximales observées atteignent des valeurs élevées, de l'ordre de 34 à 36 °C. À l'horizon 2050, des écarts par rapport à la période de référence persistent pour les mois de juin, juillet et août, bien que leur amplitude soit légèrement inférieure à celle observée au printemps (de l'ordre de +1 à +2 °C). Des températures élevées, avoisinant les trente degrés Celsius, ont persisté durant le mois de septembre. Un ralentissement du refroidissement est observé durant

la période d'octobre à novembre, les températures demeurant supérieures de 1,5 à 2 °C par

rapport à la période de référence. Tous les scénarios de trajectoires socio-économiques partagées (SSP) indiquent un réchauffement mensuel par rapport à la période de référence. Le scénario SSP5-8.5 exhibe les températures les plus élevées, suivi du SSP2-4.5, puis du SSP1-1.9.

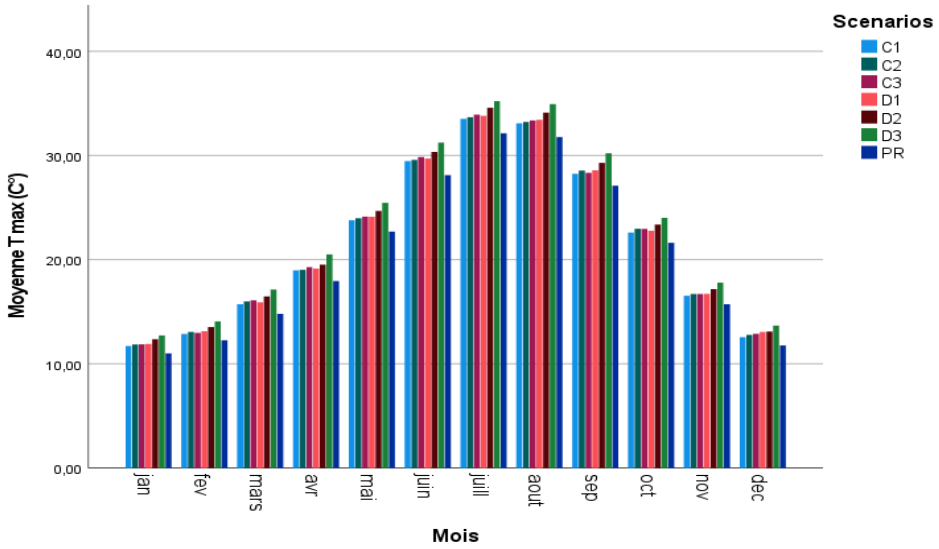


Figure 25: Comparaison de la température maximale mensuelle entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030 et 2050

2.3.3 Température minimale

La figure 26 présente l'évolution mensuelle des températures minimales (en °C) sur une année entière, en mettant en parallèle une période de référence (PR) et trois scénarios climatiques projetés pour l'année 2030 : Entre janvier et avril, une augmentation faible mais continue des températures minimales est observée, variant de +1 à +3 °C selon le scénario considéré. Entre mai et août, les températures culminent, avec des valeurs minimales supérieures à 21 °C dans les scénarios prospectifs, comparativement à environ 20–21 °C pour la période de référence. De septembre à décembre, on observe un retour progressif aux températures hivernales, bien que les valeurs attendues soient plus clémentes, notamment en décembre, avec une augmentation de deux degrés Celsius selon le scénario SSP5-8.5 par rapport à la période de référence. L'ensemble des scénarios envisagés indique un réchauffement global par

rapport à la période de référence, et ce, durant tous les mois de l'année. Le scénario SSP1-1.9 (scénario optimiste caractérisé par de faibles émissions) présente les augmentations les plus modestes, se situant entre +1 et +1,5 °C. Le scénario SSP2-4.5 se caractérise par des augmentations modérées, comprises entre +1,2 et +2 °C. Le scénario SSP5-8.5 se caractérise par les températures les plus élevées, avec des anomalies pouvant excéder +2,5 °C, en particulier durant les saisons printanières et hivernales.

Il est projeté, pour l'année 2050, une augmentation généralisée des températures minimales mensuelles par rapport à la période de référence. Cette augmentation s'avère plus marquée qu'en 2030, particulièrement durant les saisons printanière et hivernale. Entre janvier et avril, on observe une élévation graduelle et progressive des températures. En janvier, une augmentation d'environ deux virgule cinq degrés Celsius (situation de référence) à cinq degrés Celsius est observée selon le scénario SSP5-8.5, ce qui représente une hausse de deux virgule cinq degrés Celsius. En avril, la température s'élève approximativement à 13 °C selon le scénario SSP5-8.5, contre 9,5 °C pour la période de référence. De mai à août, la période estivale conserve le caractère de la saison la plus chaude, avec des températures minimales atteignant 23,5 °C, comparativement à 21 °C pour Période de référence. L'augmentation moyenne se situe entre +2 et +2,5 °C. Entre septembre et décembre, une diminution graduelle est observée, bien que les températures demeurent supérieures à celles enregistrées en période de référence. En décembre, il est observé une température d'environ 6,5 °C selon le scénario SSP5-8.5, comparativement à 4 °C en période de référence. Le scénario SSP1-1.9 révèle une augmentation modérée (variant de +1,5 à +2 °C), le scénario SSP2-4.5 une augmentation intermédiaire (atteignant +2,5 °C), tandis que le scénario SSP5-8.5 indique l'augmentation la plus significative (+2 à +3,5 °C selon la période mensuelle).

Les projections climatiques indiquent une augmentation généralisée des températures minimales, particulièrement prononcée en hiver et en été, ce qui est susceptible de : Diminuer le risque de gel hivernal, mais accentuer le stress thermique estival.

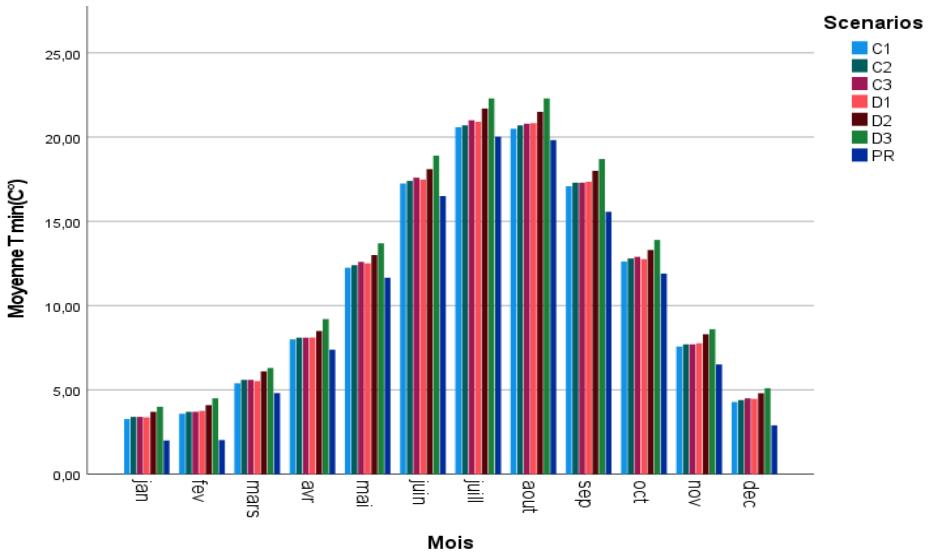


Figure 26: Comparaison de la température minimale mensuelle entre la période de référence et les scénarios ssps projetée en 2030

2.4 Vitesse de vent

Les vitesses du vent présentent une variabilité significative en fonction des mois. Les vitesses minimales sont observées autour de septembre-octobre (environ 2,2 m/s) et les vitesses maximales en mai (environ 3,2 m/s). Il se manifeste par conséquent une saisonnalité prononcée. L'ensemble des projections prospectives convergent vers une augmentation globale de la vélocité du vent comparativement à la période de référence. SSP1-1.9 : la vitesse moyenne est supérieure à celle de la (PR), mais inférieure à celle projetée par les autres scénarios prospectifs (environ 3,4–3,8 m/s). SSP2-4.5 : une vélocité marginalement supérieure à celle de SSP1-1.9 est observée. SSP5-8.5 : vitesse maximale, se situant approximativement entre 3,6 et 4,2 mètres par seconde. Dans l'ensemble des scénarios prospectifs, la courbe révèle une accélération maximale en juillet, suivie d'une diminution graduelle jusqu'en décembre. Cette observation demeure conforme à l'évolution saisonnière constatée au cours de la période de référence, bien que les valeurs soient plus importantes. En 2030, quel que soit le scénario envisagé, la vitesse moyenne du vent devrait être supérieure à celle observée actuellement. Le scénario SSP5-8.5, caractérisé par des émissions particulièrement élevées, induirait les vitesses de vent les plus importantes. La saisonnalité est maintenue, caractérisée par une intensification des vents durant la période estivale (figure 27). En 2050, le comportement exhibe une similitude avec celui constaté en 2030, caractérisé par une variation saisonnière prononcée, présentant un

maximum en avril-mai (environ 3,2 m/s) et un minimum en octobre (environ 2,2 m/s). L'ensemble des scénarios convergent vers une augmentation des vitesses éoliennes d'une ampleur supérieure à celle observée durant la période de référence. SSP1-1.9 : La vélocité fluctue approximativement entre 3,5 et 4,0 m/s. SSP2-4.5 : vitesses qui excèdent celles de SSP1-1.9 (environ 3,7–4,2 m/s). SSP5-8.5 : les vélocités les plus importantes sont observées (~3,9–4,5 m/s). Le maximum de vélocité se maintient en juillet dans tous les scénarios prospectifs, puis une diminution est observée à l'automne et en hiver.

La configuration de la courbe présente des similarités entre 2030 et 2050, bien que les valeurs soient accrues en 2050. L'accroissement des vitesses du vent s'avère plus prononcé en 2050 qu'en 2030, et ce, quel que soit le scénario considéré. Le scénario SSP5-8.5 continue de présenter l'accélération la plus marquée des vitesses de vent. Même dans le cadre du scénario SSP1-1.9, qui représente le cas le plus favorable en matière d'émissions, les taux observés se révèlent significativement supérieurs aux niveaux actuels. Il est attendu qu'en 2050, les vitesses vélocimétriques du vent dépasseront les projections établies pour 2030. Il apparaît qu'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre est corrélée à une élévation de la vitesse moyenne du vent.

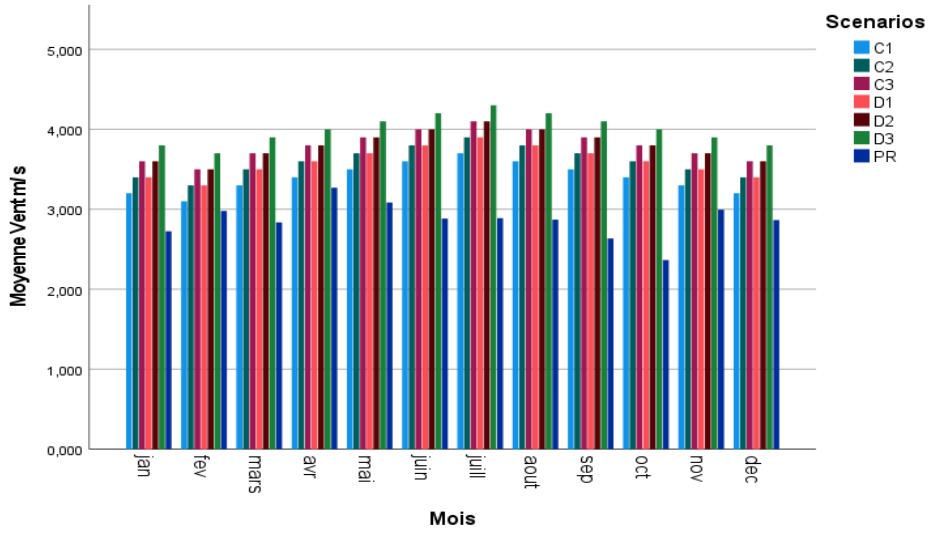


Figure 27 : Comparaison des moyennes du vitesse du vent (m/s) entre le PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030

2.5 Humidité relative

De janvier à mars, l'hygrométrie est élevée, tout en demeurant très similaire à la période de référence. D'avril à mai, il est observé une diminution significative de l'humidité comparativement aux données des références. Juin, juillet et août constituent la période la plus sèche de l'année, avec une humidité minimale avoisinant 45 à 50 %, ce qui représente des conditions plus arides que durant la période de référence. Septembre : L'humidité relative amorce une augmentation, tout en demeurant légèrement inférieure aux PR . D'octobre à décembre, l'hygrométrie retrouve des valeurs élevées, avoisinant celles observées antérieurement. Il est attendu qu'à Sétif, en 2030, les conditions estivales soient caractérisées par une aridité accrue par rapport aux conditions antérieures, particulièrement selon le scénario SSP5-8.5. Pour l'horizon temporel de 2050, et plus spécifiquement pour la période s'étendant de janvier à mars, il est attendu un taux d'humidité élevé, de l'ordre de 74 à 75 %, lequel présenterait une diminution modérée par rapport aux relevés antérieurs (PR).

Avril et mai :L'humidité diminue plus significativement qu'en 2030, et l'écart devient plus prononcé (environ 60 à 65 %). Juin, juillet et août : période caractérisée par une aridité prononcée (humidité relative approximative de 45 à 48 %), correspondant au minimum mensuelle significatif ; tous les scénarios envisagent un assèchement estival accentué par rapport aux données antérieures. Septembre : Un amorçage

d'augmentation graduelle est constaté, bien que le taux d'hygrométrie demeure inférieur aux valeurs historiquement enregistrées. D'octobre à décembre, on observe une augmentation de l'humidité, atteignant environ 70 à 75 %, une valeur comparable à celle de la période de référence (PR), bien qu'elle présente un léger déficit ; durant l'hiver et l'automne, l'humidité se situe à un niveau quasi normal, mais apparaît légèrement diminuée par rapport aux données antérieures. Il est attendu qu'au printemps et en été, l'assèchement soit plus prononcé qu'en 2030, en particulier durant les mois de juin, juillet et août. Il est anticipé que la sécheresse estivale sera plus prononcée en 2050 qu'en 2030, tandis que les périodes humides (hiver et automne) devraient être globalement maintenues, bien qu'avec une légère diminution de l'humidité par rapport aux niveaux passés (figure28).

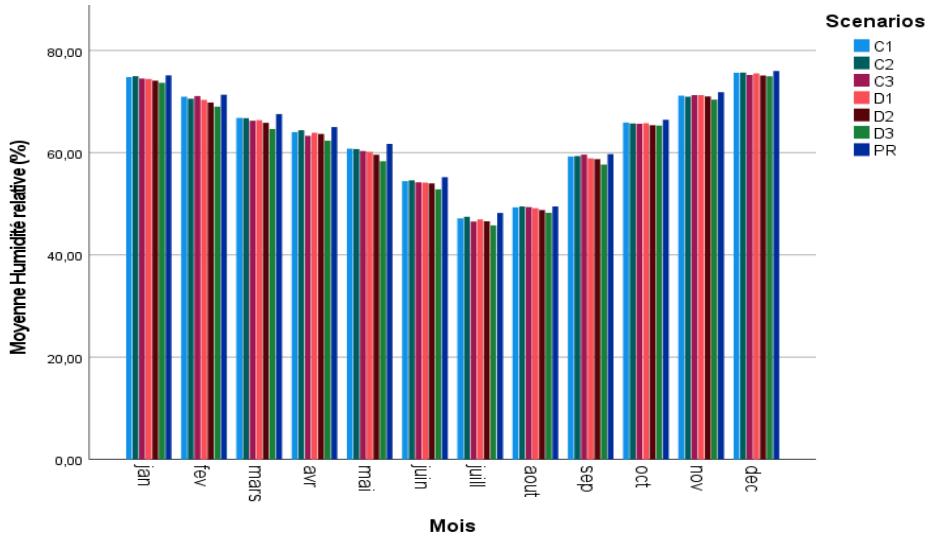


Figure 28 : Comparaison des moyennes mensuelles de l'humidité relative entre le PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050

2.6 Rayonnement solaire

L'insolation s'accroît graduellement de janvier jusqu'à un pic observé en juin et juillet, avant de décliner progressivement vers décembre. Le scénario SSP1-1.9 présente une valeur légèrement supérieure à celle du PR lors du maximum estival. Le scénario SSP2-4.5 présente une similarité notable avec le scénario SSP1-1.9, tout en affichant des valeurs légèrement supérieures ou égales. Le scénario SSP5-8.5 suit une tendance similaire, bien que les variations observées soient minimes. Les disparités

inter-scénarios se révèlent minimes. La similitude des courbes suggère qu'à l'horizon 2030, le rayonnement solaire net à Sétif devrait présenter une faible variabilité entre les différents scénarios climatiques. Maximum : juin-juillet (environ 2000 MJ/m²/mois). Valeur minimale : décembre (environ 900 MJ/m²/mois). Pour chaque mois considéré, les trajectoires de concentration représentatives (futur) excèdent légèrement la trajectoire de référence. Il est mis en évidence une faible élévation du rayonnement solaire net en 2050 comparativement à la période de référence. Le pic d'intensité est observé approximativement entre juin et juillet, atteignant environ deux mille mégajoules par mètre carré par mois (2000 MJ/m²/mois). La valeur minimale est constatée durant la période de décembre-janvier, atteignant environ mille mégajoules par mètre carré par mois. Les trois scénarios SSP (1.9, 4.5 et 8.5) présentent des similitudes notables. Il ressort de cette analyse que le rayonnement solaire net présente une faible sensibilité aux différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 à Sétif (figure 29).

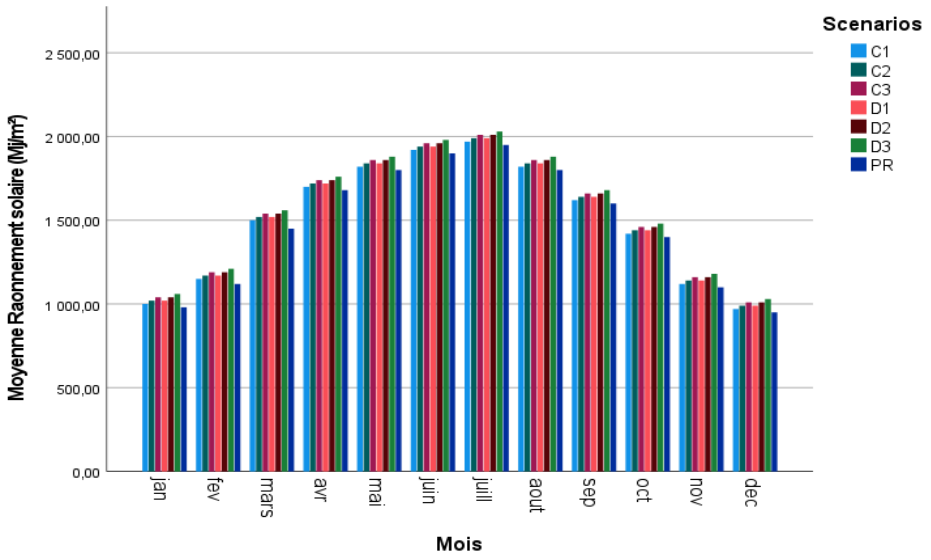


Figure 29 : Comparaison des moyennes mensuelles de rayonnement solaire entre le PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050

2.7 Évapotranspiration de référence

La méthode de FAO Penman-Monteith, une approche standardisée et universellement reconnue pour l'estimation de (ETo), a été employée pour déterminer la demande évaporative atmosphérique. (Testa et al., 2011), présentées dans le logiciel CROPWAT 8.0, correspondent aux préconisations les plus récentes de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Les prévisions concernant les températures minimales et maximales ainsi que l'humidité relative ont été extraites de l'ensemble du MCG (Modèle Climatique Global), tandis qu'il a été postulé que d'autres variables climatiques, telles que le nombre d'heures d'ensoleillement et la vitesse du vent, demeureraient stables à leurs valeurs moyennes historiques pour la période future. Les quatre courbes (PR + SSP) présentent une allure campaniforme similaire, caractéristique des climats méditerranéens, avec des valeurs minimales en hiver (janvier, décembre) et maximales en été (juin, juillet). Entre mai et août, l'ET_0 culmine à environ 220 mm par mois. Ceci témoigne d'une demande évaporative conséquente durant la période estivale, laquelle coïncide avec une élévation des températures et un ensoleillement significatif. Les trois scénarios prospectifs indiquent une augmentation modérée de l'ET_0 comparativement à la période de référence, notamment entre mars et octobre. Le scénario SSP5-8.5 présente

généralement les valeurs les plus élevées, tandis que le scénario SSP1-1.9 affiche des valeurs légèrement inférieures. Selon tous les scénarios de SSP, il est probable que l'ET_0 augmente à Sétif en 2030 par rapport à la période de référence, particulièrement durant la saison estivale. Cette augmentation de la demande évaporat ive est susceptible d'avoir des répercussions sur les besoins en irrigation, la gestion des ressources hydriques et la productivité agricole, notamment en ce qui concerne les cultures vulnérables à la sécheresse. Entre janvier et mars 2050, l'ET_0 devrait présenter une valeur faible, mais légèrement augmentée comparativement aux données antérieures. Avril et mai : on observe une augmentation significative de l'ET_0, corrélée à un besoin en eau qui devient conséquent. Juin, juillet et août constituent une période de pic maximal des précipitations (environ 220 à 225 mm par mois) associée à une évapotranspiration très importante et à un climat particulièrement sec. Septembre : Le déclin s'amorce, mais l'ET_0 demeure néanmoins à un niveau élevé. D'octobre à décembre, l'ET_0 décroît graduellement, convergeant à nouveau vers les valeurs hivernales minimales. Par conséquent, pendant la saison sèche (s'étendant de mai à septembre), une augmentation significative de l'ET_0 par rapport aux valeurs antérieures implique une demande accrue en eau pour l'agriculture. Période humide (novembre à mars) : l'écart par rapport aux données antérieures est minime, tout en demeurant marginalement plus sèche. En définitive, le scénario SSP5-8.5 présente des valeurs légèrement supérieures aux autres. Le scénario SSP2-4.5 représente une trajectoire intermédiaire. Le scénario SSP1-1.9, bien que le moins préoccupant, se caractérise néanmoins par une ET_0 supérieure aux valeurs historiques (figure 30).

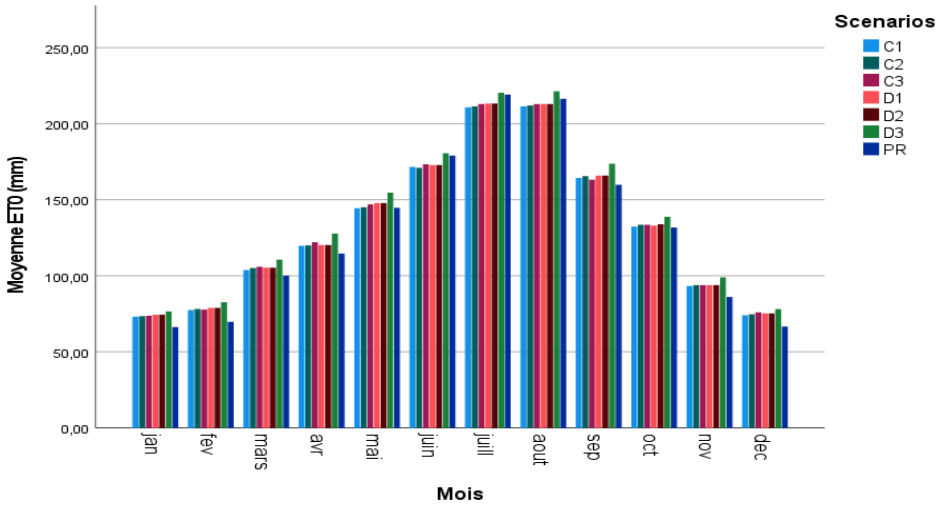


Figure 30 : Comparaison des moyennes mensuelles de l'évapotranspiration entre le PR et les trois scénarios prospectifs pour 2030 et 2050

4 Discussion

Ces projections concordent avec les études antérieures de Bouregaa et Fenni (2013), lesquelles avaient prédit une élévation moyenne des températures de 0,97°C, 1,75°C et 2,88°C pour la région de Sétif en 2025, 2050 et 2070, conformément aux scénarios SRES. L'ensemble des modèles convergent vers une projection d'augmentation de la température, quoique d'une ampleur inférieure à celle anticipée dans les scénarios A2. En dépit de ces observations, une diminution de la pluviométrie annuelle totale, variant de −4 % à −52,7 %, est anticipée, accompagnée d'une multiplication par trois selon divers scénarios. Le scénario B2 prévoit également une réduction de la pluviométrie annuelle, dont l'amplitude s'étend de −1 à −34,4 % sur les trois périodes temporelles considérées. L'étude conduite par Chourghal *et al.* (2016) révèle une simulation d'augmentation thermique et de diminution pluviométrique sur l'ensemble de l'année à Bordj Bou Arreridj ainsi qu'à Alger. La simulation a été effectuée en vertu d'un scénario SRES A1B caractérisé par une concentration élevée de CO2. Selon Bouaoune et Dahmani Megrerouche (2010), le climat algérien se caractérise par une élévation des températures et une réduction des précipitations. Il est attendu, au cours du XXIe siècle, une réduction des précipitations comprise entre −4,8 % et −23,1 % pour cette région, conformément aux scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-5.8. Dans l'analyse des

scénarios prospectifs pour la Tunisie, le scénario A1B projette une élévation de la température, alors que les changements affectant les précipitations divergent selon la localisation géographique et la période de l'année. À la lumière des scénarios SSP, le climat futur des Hauts Plateaux de Sétif devrait subir des changements significatifs, caractérisés par une augmentation des températures et une diminution des précipitations .D'ici la fin du vingt et unième siècle, les cinq scénarios indiquent des températures plus élevées et des précipitations réduites, avec SSP5-5.8 montrant des augmentations de température plus importantes par rapport à SSP1-1. 9. Lhomme et collaborateurs (2009) ont constaté une augmentation de la moyenne annuelle des précipitations à Kairouan et une diminution de cette même moyenne à Jendouba. Concernant les projections à long terme, Almazroui et coll. (2020) estiment des augmentations de températures en Afrique du Nord, selon les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-5.8, de 1,2–2,1°C, 1,2–2,4°C, et 1,4–2,5°C, respectivement, à 2,3–3,6°C et 4,1–6°C. D'après Yang et al. (2021), les projections en Chine indiquent, dans le scénario SSP5-5.8, une augmentation annuelle de la température et des précipitations plus importante que dans le scénario SSP2-4.5, d'ici la fin du XXI^{e} siècle. Il est anticipé que les températures maximales seront observées aux latitudes et altitudes supérieures de la Chine, par rapport à la période de référence 1995-2014, notamment dans les régions nord et ouest du pays, lesquelles devraient connaître l'augmentation proportionnelle la plus significative des précipitations annuelles.

Les résultats empiriques mettent en évidence une élévation saisonnière du rayonnement solaire, particulièrement prononcée de juin à août, induisant ainsi une augmentation significative de l’évapotranspiration potentielle. Cette tendance s'avère concordante avec les observations formulées par Baroudi et al. (2016), lesquels ont notifié une augmentation du stress hydrique consécutive à l'élévation des températures et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans les régions semi-arides du nord-ouest algérien.

L'examen mensuel met en évidence une diminution graduelle de l'humidité relative annuelle, notamment pendant la période chaude. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Sahraoui et Adjim (2021), lesquels ont mis en évidence une diminution de l’humidité relative dans le bassin semi-aride de Cheliff–Zahrez Nord, confortant ainsi l’hypothèse d’un assèchement climatique progressif dans les régions caractérisées par un climat semi-aride.

Les données mensuelles relatives à la vélocité du vent mettent en évidence une stabilité globale, bien que de légères augmentations soient observées au cours du printemps. Ce comportement s'apparente à celui observé dans d'autres zones présentant une topographie analogue, comme cela est rapporté dans l'étude de Sahraoui et Adjim (2021). Il est possible d'établir une corrélation entre l'accroissement observé des vitesses de vent et les altérations des gradients de pression atmosphérique régionaux, lesquelles sont imputables au changement climatique. Une faible augmentation de la vitesse moyenne du vent en jet est anticipée durant l'hiver et les saisons intermédiaires dans les deux simulations ROM, avec des augmentations relatives futures de l'ordre de 5 %, tandis qu'une variation non significative est prévue pour l'été. Les deux projections préliminaires convergent quant à une augmentation de la fréquence des vents de basse altitude en Afrique du Nord, plus particulièrement en hiver et au printemps, et dans une moindre mesure, en automne et en été. (Soares et al., 2019).

Les projections climatiques sous les scénarios SSPs indiquent une augmentation généralisée de l'évapotranspiration de référence (ET_0) dans les régions semi-arides. L'évapotranspiration de référence, qui représente un indicateur clé du changement climatique, relie directement le bilan énergétique au bilan hydrique et dépend principalement de l'eau et de l'énergie disponibles ainsi que de la pression de vapeur (Dong et al., 2019 ;Ndiaye et al., 2021). Les simulations de modèles indiquent une augmentation future des températures, une diminution des précipitations, et par conséquent une augmentation de l'évapotranspiration potentielle dans les deux scénarios RCP (Pulighe et al., 2021).

L'ampleur de ces changements varie considérablement selon les scénarios et les horizons temporels. À l'échelle annuelle, l'ET_0 devrait augmenter de 4,3% à 9,2% selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour les horizons 2050 et 2090 (Bouras et al., 2019). Pour les scénarios SSPs plus récents, les projections à 2100 montrent des augmentations d'ET_0 de 0,35 mm/jour (6%) sous SSP2-4.5 et de 0,7 mm/jour (12%) sous SSP5-8.5 (El-Rawy et al., 2023). Dans certaines régions, l'évapotranspiration pourrait augmenter jusqu'à 74% (Mohammadi et al., 2024). Cette tendance continue d'augmentation au 21ème siècle entraînera une consommation accrue des ressources en eau d'irrigation et posera de nouveaux défis pour la gestion des ressources hydriques (Dong et al., 2019). L'accroissement de l'évapotranspiration potentielle durant la saison de croissance coïncide avec une diminution de la disponibilité en eau des sols, ce qui a des

répercussions sur les rendements des cultures céréalières dans la région considérée. Baroudi et al. (2016) ont mis en évidence un phénomène analogue dans leurs recherches sur le blé dur, établissant une corrélation entre l'augmentation de l'ETP et la diminution du rendement.

Les résultats obtenus dans la même région indiquent une augmentation projetée de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique, avec des accroissements respectifs de 122, 167,1, 180,1 et 394,1 ppm selon les scénarios RCP1, RCP4.5, RCP3 et RCP8.5. Ces augmentations représentent des taux d'accroissement de +33,7 %, +46 %, +49,7 % et +108,8 % comparativement à la valeur de référence (1981-2010), en comparaison avec les projections établies pour les deux périodes futures, soit 2035-2064 et 2065-2094 (Kourat, 2021).

Conformément aux projections climatiques issues des scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (SSP1-1.9, SSP2-4.5, et SSP5-8.5), il est attendu que les régions semi-arides, à l'instar de celle de Sétif, soient sujettes à des augmentations notables du rayonnement solaire et de l'évapotranspiration potentielle d'ici à 2050. Le scénario SSP5-8.5, se distinguant par un développement intensif axé sur les énergies fossiles, induit une amplification des sécheresses et une diminution significative de l'humidité relative, exacerbant ainsi les conditions de stress hydrique affectant les cultures céréalières. Inversement, le scénario SSP1-1.9, postulant une transition vers des sources d'énergie propre, révèle une stabilisation plus graduelle des variables climatiques. Les résultats actuels corroborent les anticipations publiées par Ruane et ses collaborateurs (2021) dans le contexte de l'initiative AgMIP (Projet d'intercomparaison et d'amélioration des modèles agricoles) ainsi que les analyses issues du sixième rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). (Ruane et al., 2021 ; GIEC, 2021).

En outre, le climat semi-aride prévalant dans la région de Sétif constitue une contrainte limitant la rentabilité des exploitations agricoles. Les agriculteurs de la région se sont adaptés en modifiant leurs pratiques culturales, notamment par la réduction des cultures pluviales et la transition vers des systèmes agricoles intensifiés axés sur l'élevage et les cultures à haut rendement. Cette adaptation s'avère indispensable pour pallier les effets des aléas climatiques, notamment dans les régions méridionales et centrales. La gestion de la transition vers des systèmes agricoles

durables, la préservation de la valeur sociale de l'agriculture et l'amélioration de la rentabilité des exploitations, conjuguées à la conservation des ressources naturelles, constituent des enjeux considérables pour les futurs programmes de développement agricole (Rouabhi et al., 2019).

Il est anticipé que l'évolution climatique dans les Hautes Plaines Sétifiennes aura un impact sur les pratiques agricoles traditionnelles en altérant les régimes de température, d'évaporation et de précipitations. L'augmentation de la variabilité des conditions météorologiques est susceptible d'influer sur la périodicité et la durée des saisons culturales (Fenni ,2013). Cette imprévisibilité constitue un défi pour les agriculteurs dans la planification et la gestion de leurs activités agricoles, susceptible d'engendrer une réduction des rendements agricoles et des pertes économiques.

Néanmoins, la difficulté réside dans la sélection d'un sous-ensemble pertinent de modèles climatiques généraux (MCG) pour les projections climatiques et les analyses d'impact. L'incertitude inhérente aux modèles (MCG), qui englobe des aspects tels que la résolution du modèle, la formulation mathématique, les hypothèses sous-jacentes et les procédures de correction, constitue un obstacle à la production de prévisions climatiques futures précises (Lin et Tung 2017; Ahmed et al. 2019).

L'exclusion de certains modèles de circulation générale (MCG) de l'analyse contribue à la réduction de l'incertitude inhérente aux projections, ce que démontrent les sous-ensembles de modèles qui accordent la priorité à une reproduction moins précise du climat observé (Lin et Tung 2017). Il convient de souligner que la communauté de modélisation climatique s'est focalisée principalement sur la performance temporelle des modèles de (MCG), en omettant l'évaluation explicite de leur performance spatiale, un aspect pourtant tout aussi essentiel (Demirel et al. 2018 ; Khan et Koch 2018 ; Homsi et al. 2020).

En raison de la connaissance des hétérogénéités spatiales affectant la performance des modèles climatiques globaux (MCG), une approche reposant sur un ensemble multi-modèle (EMM) est préconisée par certains chercheurs. Il s'agit de constituer un ensemble de modèles de (MCG) et d'exclure ceux dont la capacité de simulation est inférieure, ce qui contribue à la réduction des incertitudes associées aux MCG (Lutz et al. 2016 ; Samir et Lutz 2017 ; Ahmed et al. 2019 ; Shiru et al. 2019 ; Shiru et Chung, 2021). Il reste cependant essentiel de reconnaître que la réduction

efficace de l'incertitude constitue un défi considérable pour la majorité des(MCG), ce qui complexifie l'agrégation de plusieurs modèles pour les prévisions climatiques (Knutti et al. 2010). d'une adaptation des itinéraires techniques, des sélections variétales et des calendriers culturaux, notamment pour les cultures sensibles telles que le blé dur et le blé tendre.

Chapitre II :

Évaluation des impacts potentiels du changement climatique futur sur le rendement des cultures, la couverture végétale, la paille et la productivité en eau du blé dur et tendre pluviales dans les hautes plaines de Sétif

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de simuler les impacts du changement climatique (CC) prévus pour les périodes 2020–2039 et 2040–2069, sous les scénarios SSP1-1.9, SSP4-4.5 et SSP5-8.5, sur la culture pluviale du blé dur (BD) et du blé tendre (BT), en les comparant avec la période de référence (1995–2014).

Par ailleurs, le chapitre comprend la calibration et la validation du modèle AquaCrop à partir des données expérimentales recueillies sur le site de l'ITGC de Sétif durant les campagnes agricoles 2021–2022, 2022–2023 et 2023–2024.

Ainsi, ce chapitre vise à répondre aux questions suivantes :

- Pensez-vous que le modèle AquaCrop puisse être efficace dans les conditions semi-arides des plaines de Sétif ?
- Quels seront les impacts futurs du CC sur le WP de BD et BT, la biomasse sèche et le rendement ?
- Comment les cultures de BD et BT peuvent-elles être ajustées pour s'adapter à CC à l'avenir ?

2 Modélisation de l'influence de CC Future sur la culture du blé

2.1 Évaluation de l'efficacité du modèle AquaCrop à simuler les rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et l'humidité de sol

La performance du modèle AquaCrop a été évaluée en comparant les données observées et simulées de divers paramètres agronomiques, tels que le rendement, la paille, l'humidité du sol et la canopée, pour les deux types de blé : le blé dur (Oued El Bared) et le blé tendre (El Wifek), sur trois saisons agricoles consécutives à Sétif (2021-2024). Les données révèlent une concordance très précise entre les valeurs simulées et observées pour le blé dur, avec des indicateurs statistiques satisfaisants (RMSE = 0,34 t/ha ; NRMSE = 22,1 % ; d = 0,90, R = 0,99 en ce qui concerne le rendement (figure 31). Concernant la biomasse aérienne sèche (Figure 32), les résultats demeurent également satisfaisants (RMSE = 0,68 t/ha ; NRMSE = 22,1 % ; d = 0,90 R = 0,87) (Tableau 5). Pour le blé tendre, le modèle démontre une précision acceptable en termes de rendement (RMSE = 2,25 t/ha ; NRMSE = 34,7 % ; d = 0,83, R= 0,94), néanmoins, pour la biomasse sèche, les performances sont moins satisfaisantes (RMSE = 1,19 t/ha

; NRMSE = 34,38 % ; d = 0,47, R = 0,87) (Tableau 6). En ce qui concerne l'humidité du sol, la simulation est généralement précise, avec une légère préférence pour le blé tendre (Figure33). De plus, le modèle démontre une excellente performance en termes de simulation de la couverture du couvert végétal, particulièrement pour le blé dur (d = 0,99). En conclusion, AquaCrop démontre son efficacité en tant qu'outil de modélisation des rendements agronomiques du blé dur dans les conditions semi-arides de Sétif. Toutefois, des modifications pourraient être envisagées afin d'optimiser la simulation du blé tendre (Figure 34).

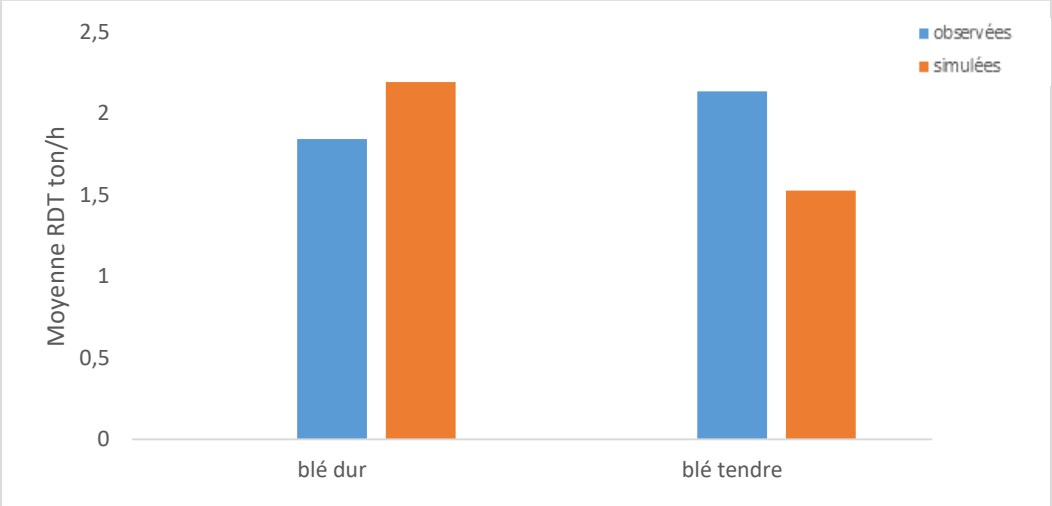


Figure 31 : La moyenne des rendements observés et simulés de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2024)

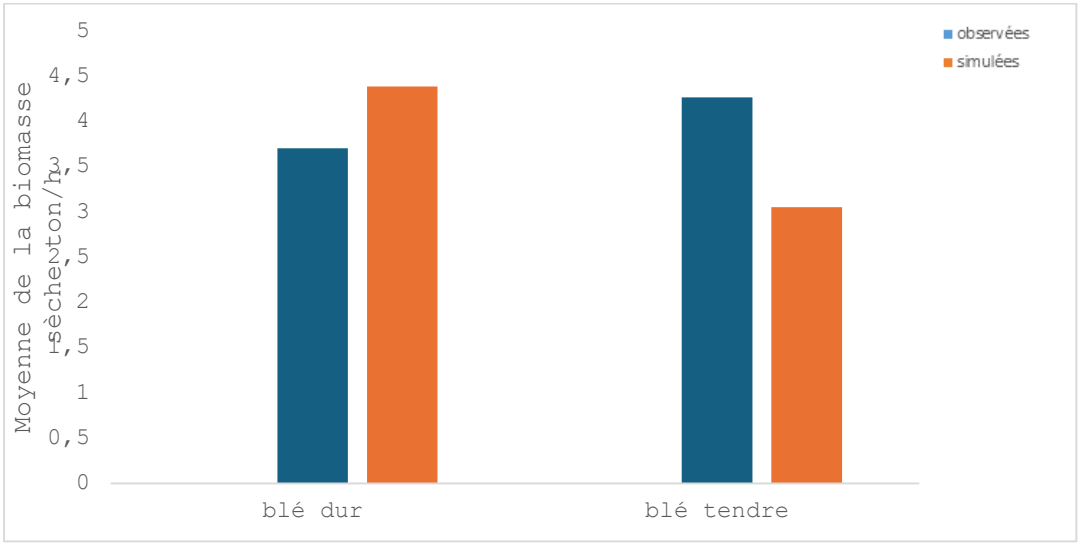


Figure 32 : La moyenne de la biomasse sèche observés et simulés de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2024)

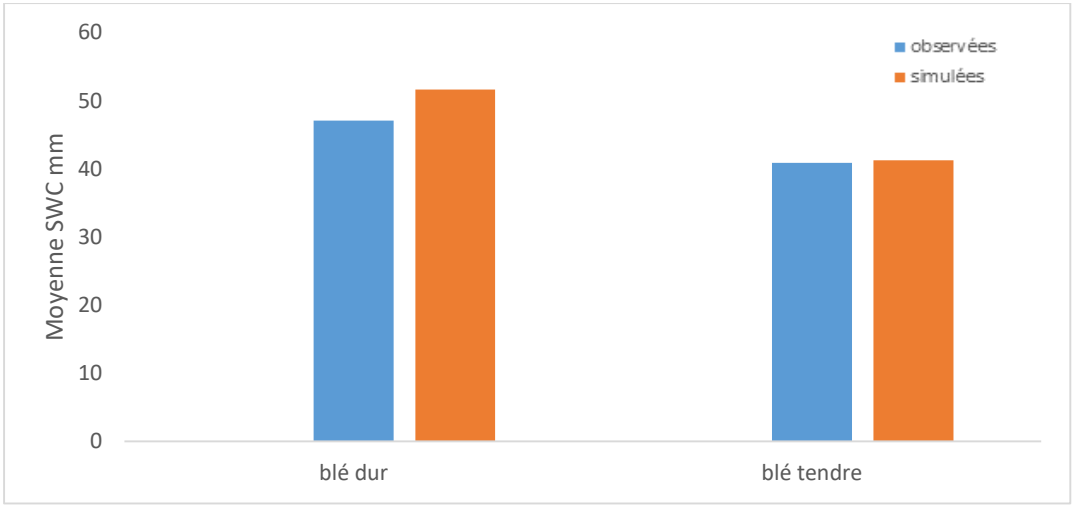


Figure 33 : La moyenne du teneur en eau du sol observés et simulés de la culture du « Oued el Bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2024)

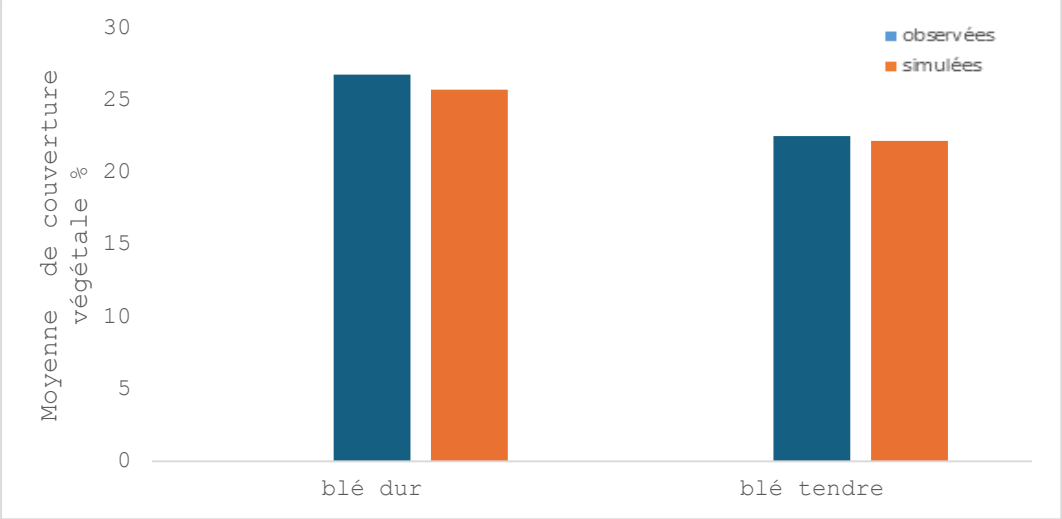


Figure 34 : La moyenne de couverture végétale observés et simulés de la culture du BD « Oued el bared » et « El Wifek » par le modèle AquaCrop pour les trois saisons agricoles (2021-2024)

Tableau 5 : Performance du modèle Aquacrop dans la simulation des rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et la teneur de l'humidité du sol du cultivar de blé dur « Oued el Bared » observés et simulés au cours des trois saisons agricoles : 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024

Compagne agricole	**RMSE**				**NRMSE**				**Willmot agreement**			
	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton /h)	Rendement (ton/h)	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton /h)	Rendement (ton/h)	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton /h)	Rendement (ton/h)
2021-2022	5.4	13.2	0.83	0.419	18	20.7	17.81	17.8	0.99	0.71	0.91	0.93
2022-2023	4.9	6.3	0.84	0.422	14.8	19.6	39.89	39.9	0.99	0.73	0.87	0.86
2023-2024	2.1	7	0.37	0.185	14.7	15.4	8.62	8.6	0.99	0.70	0.94	0.98
La moyenne	4.13	8.83	0.68	0.342	15.83	18.57	22.10	22.1	0.99	0.71	0.91	0.92

Compagne agricole	**R**			
	Couverture de canopée (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton /h)	Rendement (ton/h)
2021-2022	0.98	0.96	0.92	1
2022-2023	0.90	0.53	0.91	0.99
2023-2024	1	0.77	0.77	0.97
La moyenne	0.96	0.75	0.87	0.99

Tableau 6 : Performance du modèle Aquacrop dans la simulation des rendements, la biomasse sèche, la couverture végétale et la teneur de l'humidité du sol du cultivar de blé tendre « El Wifek », observés et simulés durant les trois saisons agricoles : 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024

Compagne agricole	**RMSE**				**NRMSE**				**Willmot agreement**			
	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton / h)	Rendement (ton/h)	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton / h)	Rendement (ton/h)	Canopée cover (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton / h)	Rendement (ton/h)
2021-2022	6.8	3.4	0.802	0.449	24.2	7.6	16.4	18	0.97	0.96	0.202	0.91
2022-2023	6.8	6.8	2.236	1.108	21 .3	21.3	76	75.4	0.69	0.69	0.792	0.62
2023-2024	4	6.7	0.524	0.262	18.2	16.3	10.74	10.4	0.98	0.72	0.420	0.96
La moyenne	5.86	5.63	1.187	0.606	21.23	15.06	34.38	34.7	0.88	0.79	0.471	0.83

Compagne agricole	**R**			
	Couverture de canopée (%)	SWC (mm)	Biomasse aérienne (ton /h)	Rendement (ton/h)
2021-2022	0.99	0.92	0.95	0.96
2022-2023	0.95	0.48	0.92	0.93
2023-2024	0.97	0.91	0.93	0.95
La moyenne	0.97	0.77	0.87	0.94

Les résultats de la simulation du modèle ont démontré que celui-ci reproduit de manière satisfaisante le contenu en eau du sol dans la zone racinaire (SWC), le recouvrement du couvert végétal (CC), le rendement en grains (GY) et la biomasse sèche du blé. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée entre les valeurs simulées et observées de SWC, CC, GY et BM s'élevait respectivement à 21,1 mm, 7,1 %, 0,32 t ha-1 et 0,34 t ha-1.

Selon l'étude de Kale et Madenoğlu (2018), les indices d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF) et de Willmott (d) ont également été évalués, atteignant respectivement 0,89 et 0,98 pour le contenu en eau du sol (SWC), 0,74 et 0,93 pour la couverture végétale, 0,98 et 0,92 pour la biomasse et 0,95 et 0,82 pour la conductivité hydraulique. Dans la plaine septentrionale de Chine, les résultats obtenus ont mis en évidence une concordance entre, d'une part, la couverture du couvert végétal simulée (CC), le rendement de biomasse sèche et le rendement en grains (GY) et, d'autre part, les valeurs mesurées de CC, BY et GY, avec des coefficients de détermination (R^2) respectifs de 0,93, 0,91 et 0,93 pour la culture de blé d'hiver (Jin et al., 2014).

L'adaptation du modèle AquaCrop pour la culture du blé dans un contexte méditerranéen a été jugée excellente, notamment en ce qui concerne les paramètres SWC et CC, avec des valeurs de NRMSE de 8,0 % et 11,3 % respectivement lors de la première campagne, et de 3,7 % et 1,8% lors de la seconde campagne. Les indices, dont les valeurs se sont stabilisées initialement autour de l'unité, ont présenté des variations comprises entre 0,86 et 0,97 lors de la première campagne, puis entre 0,96 et 0,98 pour la seconde, en conservant les mêmes paramètres (Belkhiri et al., 2019). Dans le cadre du modèle AquaCrop, le (NRMSE) moyen observé lors de la calibration pour la prédiction de la teneur en eau du sol dans le cas du blé d'hiver s'élève à 18,91 %. Aux fins de validation, cette valeur s'élève à 19,6 % (Khorsand et al., 2014). Dans une région semi-aride d'Iran, les résultats indiquent que la valeur du NRMSE pour la teneur en eau du sol variait entre 10 et 20% dans le cas du colza. Les résultats de la teneur en eau du sol (SWC), simulés et mesurés, pour les quatre traitements hydriques, ont mis en évidence la précision acceptable du modèle AquaCrop (Khorsand et al., 2024).

2.2 Climat anticipé pour la saison de croissance du blé dur et tendre dans le futur

Le tableau 7 présente l'évolution prospective de trois facteurs climatiques essentiels, à savoir la température annuelle moyenne, les précipitations annuelles et le rayonnement solaire net, en comparant une période de référence (PR) avec des projections basées sur trois scénarios socio-économiques partagés (SSP) : SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5. L'étude examine deux périodes temporelles distinctes, à savoir 2030 et 2050. La température moyenne de référence est de 14,91 °C pour les deux périodes considérées (2030 et 2050). Tous les scénarios prospectifs indiquent une augmentation substantielle des températures par rapport à la période de référence.

L'ampleur du réchauffement est directement corrélée à l'importance des émissions de gaz à effet de serre (GES) envisagée dans chaque scénario. Selon le scénario SSP5-8.5, une augmentation de température de 4,40 °C est prévue pour 2050, ce qui témoigne d'une altération climatique significative. L'élévation des températures (de +2,75 °C à +4,40 °C selon les scénarios et les périodes considérées) entraîne une accélération des étapes de développement du blé, notamment la levée, le tallage, la montaison, l'épiaison et la maturation, ce qui se traduit par une avancée de la phénologie. Cela pourrait également prolonger la durée de la saison de croissance hivernale dans certaines régions caractérisées par un climat froid. Une réduction globale des précipitations est observée, accompagnée d'une intensification progressive corrélée à des scénarios plus pessimistes. D'ici à 2050, une diminution potentielle de -15 % selon le scénario SSP5-8.5 pourrait aggraver la vulnérabilité hydrique : une augmentation du stress hydrique est observée, notamment durant les phases phénologiques critiques telles que la montaison et la floraison, ainsi qu'une diminution de la biomasse et du nombre de grains par épi lors de la phase de remplissage. Le rayonnement solaire, quantifié en mégajoules par mètre carré (Mj/m^2), constitue la source énergétique indispensable à la photosynthèse, mécanisme par lequel les végétaux transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique. Une élévation du rayonnement, telle que prévue dans les scénarios climatiques (par exemple, +83,33 Mj/m^2 en 2050 selon le scénario SSP5-8.5), est susceptible d'accroître le taux de photosynthèse, en particulier si d'autres facteurs tels que l'eau et les nutriments ne constituent pas des éléments limitants. Il est possible d'observer, en conséquence, une augmentation de la production de matière sèche, un développement accru des feuilles, des tiges et des épis, et potentiellement une amélioration du rendement grainier. Une intensité lumineuse élevée est également susceptible d'accélérer le rythme de développement phénologique, par la stimulation du métabolisme végétal. Néanmoins, cela pourrait induire un raccourcissement de certaines phases cruciales, telles que le remplissage des grains, en particulier si une augmentation excessive de la température est concomitante.

Tableau 7 : Comparaison des moyennes interannuelles de TCC, PCC, Rn CC entre le PR et les scénarios à venir. SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5

Scénarios	Température (C°)	changement	précipitation (mm)	changement	Rayonnement solaire(Mj /m²)	changement
2030						
PR	14.91		525.81		1477.5	
SSP1.9	17.72	2.75	498.29	-27.52	1500.83	23.33
SSP4.5	17.96	3.05	501.33	-24.48	1520.83	43.33
SSP8.5	18.01	3.1	493.82	-31.99	1540.83	63.33
2050						
PR	14.91		525.81		1477.5	
SSP1.9	18.01	3.1	488.82	-36.99	1520.83	43.33
SSP4.5	18.63	3.72	473.33	-52.48	1540.83	63.33
SSP8.5	19.31	4.4	446.92	-78.89	1560.83	83.33

2.3 Analyse de l'effet du changement climatique à venir sur la culture du blé dur et du blé tendre pluvial

Le modèle AquaCrop a calculé la durée de cycle de croissance pour le cultivar de blé dur et tendre simulé sur le site expérimental de Sétif, ainsi que pour le PR et les scénarios futurs SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5. Cette simulation a été réalisée en fixant la date de semis au 15 novembre, choix justifié par son utilisation répandue par les agriculteurs de la zone d'étude durant la période de référence (PR) et les trois scénarios futurs (SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5) en 2030 et 2050 : les rendements de blé dur (q/ha), la biomasse sèche (q/ha) et la WP pour le cultivar de blé dur « Oued el Bared » et le blé tendre « El Wifek ».

2.4 Estimations et prévisions des rendements, biomasse sèche, productivité de l'eau de blé dur et tendre dans les perspectives de changements climatiques futurs

Le modèle a prédit avec précision la couverture du couvert végétal, les rendements des grains et la biomasse, tandis que la productivité de l'eau est estimée avec une précision modérée (Kale et Madenoğlu, 2018).

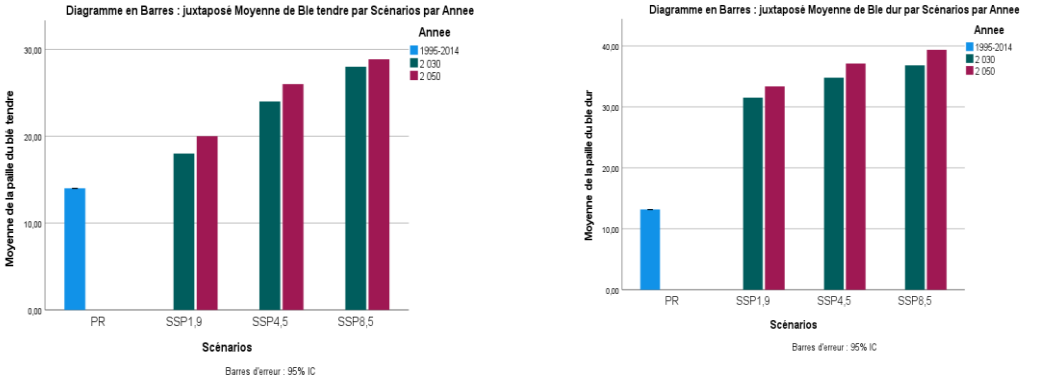


Figure 35: Comparaison des moyennes de la biomasse sèche du blé tendre et dur (1995-2014) entre les scénarios PR et SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 pour les projections futures (2030-2050)

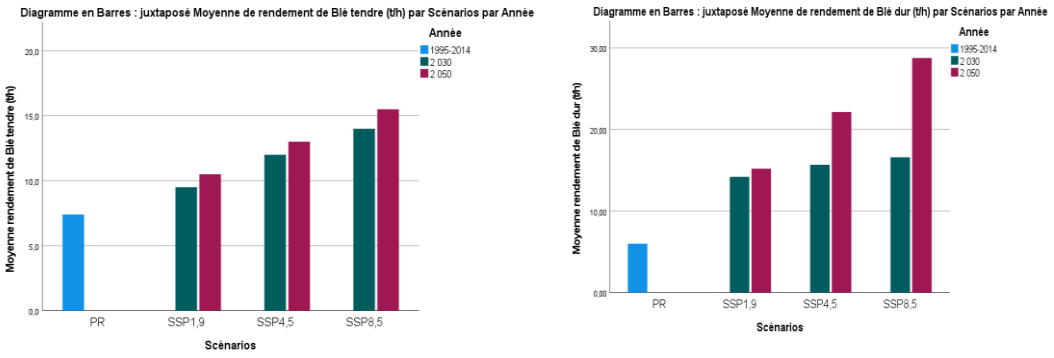


Figure 36: Comparaison des moyennes de rendement du blé tendre et du blé dur (1995-2014) entre les scénarios SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 du PR pour les projections futures (2030-2050)

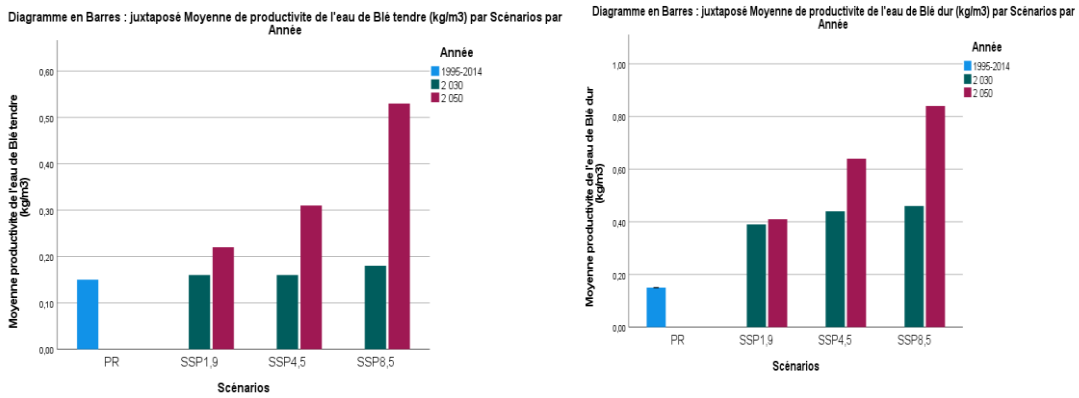


Figure37 : Comparaison des moyennes de la productivité de l'eau du blé tendre et du blé dur (1995-2014) entre les scénarios PR et SSP1.9, SSP4.5 et SSP8.5 pour les projections futures (2030-2050)

Les figures : 35, 36 et 37 montrent une comparaison des moyennes sur deux décennies des principaux indicateurs agro-climatiques et agronomiques, tels que le rendement, la biomasse, la productivité de l'eau (WP) pour deux types de blé : le blé dur et le blé tendre. Cette comparaison s'étend sur une période de référence (PR = 1995-2014) et trois scénarios climatiques futurs : SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5, projetés pour 2030 et 2050. Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle AquaCrop en mode 'paramètre limité', sans intervention humaine, c'est-à-dire sans ajustements des pratiques culturales, ni apport d'irrigation ou d'améliorations technologiques. Par conséquent, les résultats obtenus reflètent uniquement la réponse climatique des cultures aux conditions environnementales semi-arides, ce qui explique la diminution simulée du rendement dans certains cas. En l'absence de mesures d'adaptation, le potentiel de production est donc restreint par les facteurs climatiques et édaphiques naturels.

2.5 Projections futures des rendements de blé dur et tendre

Les performances du blé dur dans les scénarios futurs montrent une amélioration significative par rapport à la période de référence, comme le révèlent les résultats. En 2030, le rendement augmente de 6 quintaux par hectare (PR) à 14,20, 15,68 et 16,60 quintaux par hectare sous les scénarios SSP1.9, SSP4.5 et SSP5-8.5 respectivement. En 2050, cette progression devient encore plus marquée, atteignant 15,20, 22,15 et 28,75 q/ha sous SSP1.9, SSP4.5 et SSP5-8.5. Le rendement du blé tendre est initialement (7,4 q/ha) durant la période de référence. Cependant, les projections futures indiquent une

amélioration notable, particulièrement sous le scénario SSP5-8.5, où la production atteint 14 q/ha en 2030 et 15,5 q/ha en 2050.

2.6 Projections futures de la biomasse sèche de blé dur et tendre

La biomasse sèche de blé dur connaît une augmentation significative, passant de 13,17 q/ha pour la période de référence à 31,52, 34,80 et 36,83 q/ha en 2030, et à 33,77, 37,12 et 39,38 q/ha en 2050 sous les scénarios SSP1.9, SSP4.5 et SSP5-8.5 respectivement. Cela indique un développement végétatif plus prononcé. De même, pour le blé tendre, la biomasse augmente de 14 q/ha pour la période de référence à 18, 24 et 28 q/ha en 2030, et à 20, 26 et 28,86 q/ha en 2050 sous les scénarios SSP1.9 et SSP8.5 respectivement.

2.7 Projections futures de la productivité de l'eau de blé dur et tendre

La productivité de l'eau (WP) pour la culture de blé dur est multipliée par plus de cinq entre PR (0,15 kg/m³) et SSP5-8.5 en 2050 (0,84 kg/m³), ce qui traduit une amélioration de la performance d'utilisation de l'eau, avec des valeurs de 0,41 et 0,64 sous SSP1.9 et SSP4.5 respectivement. Pour 2030, WP est de 0,39, 0,44 et 0,46kg/m³. Une progression similaire est observée pour la culture de blé tendre : d'ici 2050, la WP sous les scénarios SSP1.9, SSP4.5 et SSP5-8.5 atteindra 0,22, 0,31 et 0,53 kg/m³, comparativement à 0,15 kg/m³ à la PR. Cela indique une amélioration significative de l'efficience de l'utilisation de l'eau par la culture. Ces résultats soulignent l'importance des scénarios prévisionnels pour anticiper les réactions des systèmes agricoles face au changement climatique et pour orienter les politiques de gestion durable de l'eau et de la sécurité alimentaire. Ils mettent en lumière une opportunité locale d'optimisation de la production céréalière sous changement climatique, à condition que les variétés semées soient adaptées aux nouvelles conditions climatiques, que les dates de semis soient optimisées, et que les pratiques culturales soient améliorées. Il est important de noter que ces effets positifs ne sont pas garantis à long terme, car la variabilité interannuelle des précipitations, les pics de chaleur extrême et les risques de maladies peuvent inverser ces tendances.

3 Discussion

Les chercheurs emploient divers cadres de modélisation pour évaluer les impacts du changement climatique sur la production de blé dans les régions semi-arides. L'approche la plus courante associe les modèles de circulation globale (MCG) du Projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP5 et CMIP6) à des modèles de simulation de cultures (Dhakal et al.,2018 ; Shoukat et al., 2022 ; Ebrahimi et al., 2025). Les scientifiques privilégient généralement des approches d'ensemble, en moyennant les résultats de plusieurs modèles de circulation générale (MCG) afin de réduire l'incertitude et d'améliorer la fiabilité des projections (Bouras et al., 2019 ; Kheir et al., 2024). Le processus de modélisation se décompose en trois étapes principales : premièrement, les données climatiques des modèles de circulation générale sont réduites à des échelles régionales à l'aide de méthodes telles que Med-CORDEX ou des approches quantile-quantile (Bouras et al., 2019 ; Kheir et al., 2024). Deuxièmement, ces données climatiques réduites alimentent des modèles d'impact sur les cultures tels que DSSAT CERES-Wheat, AquaCrop, GEPIC ou LPJmL pour simuler la croissance et le rendement du blé (Bouras et al., 2019 ; Shoukat et al., 2022 ; Ghio et al., 2023). Troisièmement, les chercheurs analysent les résultats sur différents horizons temporels, en examinant généralement les périodes à court terme (2021-2040), à moyen terme (2041-2060) et à long terme (2071-2100) (Mirgol et al., 2020; Shoukat et al., 2022). Les approches d'apprentissage automatique sont de plus en plus intégrées aux modèles de cultures traditionnels, avec des algorithmes entraînés capables de prédire les rendements dans des scénarios climatiques futurs en substituant les données météorologiques historiques par des variables climatiques projetées (Kheir et al.,2024). Ces modèles peuvent évaluer simultanément plusieurs facteurs, notamment les impacts du stress thermique et du gel sur le développement du blé et le moment de la floraison (Bai et al., 2022). Un aspect crucial de ces approches de modélisation est la prise en compte des effets de la fertilisation par le CO_2, qui peuvent influencer significativement les projections de rendement. Les modèles intégrant l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2 prédisent souvent des augmentations de rendement susceptibles de compenser les pertes liées aux températures et aux précipitations (Bouras et al., 2019 ; Shoukat et al., 2022). Des études examinent également divers scénarios de gestion, en comparant les conditions irriguées et pluviales pour comprendre comment la

disponibilité de l'eau interagit avec les impacts du changement climatique (Bouras et al., 2019 ; Ghio et al., 2023).

3.1 Effet du changement climatique futur sur le rendement du blé

Les effets du changement climatique sur les rendements du blé dans les zones semi-arides révèlent des tendances principalement négatives dans de nombreuses études et scénarios. Les diminutions de rendement varient considérablement en fonction de la région, de la période et du scénario climatique, la plupart des études prévoyant des baisses de 10 à 35 % d'ici le milieu du siècle (Mirgol et al., 2018 ; Khordadi et al., 2019 ; Hussain et al., 2021). Certaines régions subissent des impacts plus sévères, avec des études prévoyant des baisses de rendement de 50 à 100 % dans les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 (Mirgol et al., 2020) et des réductions allant jusqu'à 59,95 % pour la production de blé pluvial (Shayanmehr et al., 2022). L'ampleur des impacts sur les rendements varie considérablement selon les régions semi-arides et les cultivars. En Éthiopie, les rendements du blé devraient diminuer de 15,6 à 27 % selon le scénario RCP4.5 et de 21,9 à 23,9 % selon le scénario RCP8.5 d'ici les années 2050 et 2080 (Tufa et al., 2018). De même, des études menées en Tunisie prévoient une diminution de 28 % des rendements du blé d'ici 2050 (Haj-Amor, 2019), tandis que les recherches menées au Kazakhstan montrent des pertes de rendement supérieures à 10 % dans les zones de steppe aride selon les scénarios RCP8.5 (Teleubay et al., 2023). Cependant, certaines études révèlent des schémas temporels plus complexes, avec des augmentations potentielles des rendements à court terme suivies de baisses à plus long terme. Des recherches utilisant des approches d'apprentissage automatique et des modèles de cultures montrent que les rendements du blé pourraient augmenter légèrement à court terme (2010-2039) avant de diminuer significativement par la suite (Moghaddam et al., 2023). De même, certaines régions de Chine devraient connaître des augmentations de rendement de 11 à 13 % dans les projections du milieu du siècle selon les scénarios SSP (Shoukat et al., 2022 ;Xu et al., 2024). L'effet fertilisant du CO_2 apparaît comme un facteur critique susceptible de modifier considérablement les projections de rendement. Des études tenant compte de la hausse des concentrations atmosphériques de CO_2 montrent que les rendements optimaux du blé pourraient augmenter de 7 à 13 % d'ici le milieu du siècle, malgré les contraintes de température et de précipitations (Bouras et al., 2019). Les recherches démontrent qu'une concentration élevée de CO_2 peut réduire les pertes de rendement de 26,5 % à 12,6 %

dans les scénarios RCP8.5 (Bisht et al., 2024) et peut entraîner des améliorations de rendement de 6,6 à 78,7 % dans les systèmes pluviaux semi-arides (Karandish et al., 2021). Les facteurs géographiques et de gestion influencent de manière significative l'ampleur des impacts du changement climatique. Les systèmes de blé pluvial sont généralement plus vulnérables que les systèmes irrigués, la production pluviale étant celle qui devrait subir les plus fortes baisses prévues (Mourad et al., 2017 ; Shayanmehr et al., 2022). Des études régionales indiquent que les zones de steppe aride sont généralement plus sensibles à l'augmentation des gaz à effet de serre que les autres sous-zones semi-arides (Teleubay et al., 2023), tandis que les régions du nord peuvent bénéficier d'une augmentation des précipitations, alors que les régions du sud sont confrontées à des limitations de température (Xu et al., 2024). Les projections climatiques pour les régions semi-arides révèlent des changements substantiels des températures et des précipitations qui affecteront directement la production de blé. Dans les régions semi-arides de l'est de l'Algérie, les précipitations annuelles moyennes actuelles s'élèvent à 382,3 ± 96,3 mm, avec des précipitations de saison de croissance (novembre-juin) de 278,3 mm et des précipitations printanières de 101,9 mm. Selon les scénarios climatiques futurs (2071-2100), ces valeurs devraient diminuer à 303,7 ± 99,4 mm par an, 232,3 mm pendant la saison de croissance et 83,3 mm au printemps (Chourghal et al., 2023). Contrairement à de nombreuses études soulignant une baisse des rendements sous l'effet du changement climatique, les résultats obtenus pour la région semi-aride de Sétif montrent une hausse des rendements du blé dur et du blé tendre à l'horizon 2030 et 2050 sous les trois scénarios climatiques étudiés (SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5). Cette amélioration peut s'expliquer par plusieurs facteurs : l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique (effet fertilisant), des précipitations favorables durant les phases sensibles du cycle phénologique, et une possible adaptation génétique des variétés utilisées à des températures légèrement plus élevées. Ces résultats concordent avec certaines études récentes. Asseng et al. (2019) ont démontré que, dans certaines régions méditerranéennes, l'augmentation du CO_2 peut partiellement compenser les effets négatifs de la hausse des températures, à condition que l'eau du sol demeure disponible. De même, Sánchez et al. (2021) ont rapporté une amélioration de la croissance et des rendements du blé en Espagne sous des scénarios RCP similaires aux SSP, notamment grâce à une meilleure assimilation du CO_2. Les rendements prévus du blé dur sous RCP 8.5 surpassent ceux anticipés sous RCP 4.5, à l'exception de la période de 2035 à 2064 sous RCP 4.5 où le rendement du BD est

supérieur à celui prévu sous RCP 8.5 sur le site d'expérimentation de Sétif. Ces améliorations de rendement dans les projections futures sont attribuées à l'effet fertilisant de l'augmentation du CO_2 atmosphérique, envisagé dans les quatre scénarios prospectifs. Comme la concentration de [CO_2] durant la période de référence (PR) était estimée à 362 ppm, on prévoit qu'elle atteindra respectivement 484,1, 529, 542 et 756 ppm dans divers scénarios futurs de changement climatique : RCP1, RCP2, RCP3 et RCP4. Par conséquent, l'impact fertilisant du [CO_2] sur les rendements futurs de BD prévus par AquaCrop à Sétif et BBA est également corroboré par le fait que les rendements simulés sont généralement supérieurs en 2065-2094 comparativement à 2035-2064, sauf pour RCP 4.5 à BBA, où le rendement anticipé est plus élevé en 2035-2064 qu'en 2065-2094. (Kourat, 2021).

3.2 Effet du changement climatique futur sur la productivité de l'eau du blé

La productivité en eau, mesurée en kilogrammes de grain, s'améliore de manière significative dans les trois scénarios analysés. Cette amélioration peut être attribuée à une réduction de la transpiration due à la fermeture partielle des stomates sous l'effet de l'enrichissement en CO_2, à une meilleure efficacité d'utilisation des ressources hydriques, et à une répartition temporelle plus favorable des précipitations. Cette tendance est corroborée par Hatfield et Dold (2019), qui ont démontré que l'augmentation du CO_2 améliore d'utilisation de (WP) des cultures, notamment dans les zones soumises à un stress hydrique modéré. De plus, Kouadio et al. (2020) ont observé une amélioration de la productivité de l'eau du blé au Maghreb, sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. À l'avenir, il pourrait être recommandé d'utiliser le programme de simulation AquaCrop pour différentes variétés de blé afin de prédire la productivité en unités d'eau dans ces zones semi-arides, notamment sous différents systèmes d'irrigation. L'utilisation de ce programme repose sur l'entrée des données les plus cruciales (climat, plante, sol et eau). Ainsi, il est envisageable de prévoir les résultats pour les données de production de l'unité d'eau, ce qui sera utile pour identifier des scénarios appropriés en cas de modifications climatiques, de pénurie d'eau ou de nutriments, ou encore de changements dans les caractéristiques du sol (Mansour et al., 2020). Tandis que le contenu en eau du sol à une profondeur de 90 cm a été estimé avec une précision modérée. Les résultats indiquent que le modèle AquaCrop peut être recommandé comme un outil pratique pour décider s'il faut irriguer le blé ou non dans les zones à ressources en eau limitées (Kale et Madenoğlu, 2018). L'impact du

changement climatique sur la productivité de l'eau du blé présente des tendances contrastées selon les scénarios SSPs, influencées par des facteurs climatiques concurrents. Les études montrent que (WP) peut s'améliorer significativement sous les conditions climatiques futures, avec des augmentations projetées de 8,8 à 46,4 % dans tous les traitements étudiés (Niu et al., 2022). Cette amélioration résulte principalement de l'effet de fertilisation du CO_2, où l'augmentation du rendement du blé s'accompagne d'une diminution de la consommation d'eau (évapotranspiration), conduisant à une amélioration significative de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Xiao et al., 2018).

Les projections indiquent également des impacts négatifs significatifs sur la productivité de l'eau des cultures (CWP). Selon les scénarios RCP, la CWP devrait diminuer de 9 % à 18,3 % pour RCP 4.5 et de 10,6 % à 22,6 % pour RCP 8.5 au cours des décennies 2030, 2050 et 2070 respectivement, en tenant compte des concentrations de CO_2 de référence. L'effet bénéfique de la fertilisation par le CO_2 atténue ces réductions, entraînant des diminutions relativement moindres sous les concentrations futures de CO_2 (Bisht et al., 2024). Les rendements de blé présentent également une variabilité selon les scénarios SSPs, avec des projections de déclin de 21 % sous SSP8.5 et de 5 % sous SSP4.5 vers le milieu du siècle (2050), l'incertitude associée au scénario SSP8.5 étant plus importante (Kheir et al., 2024). Ces variations dans les rendements influencent directement la productivité de l'eau, créant des défis pour l'optimisation des stratégies d'irrigation dans les régions semi-arides.

3.3 Effet du changement climatique futur sur la biomasse sèche du blé

Les projections montrent également une augmentation de la biomasse sèche totale (en t/ha) dans la région semi-aride de Sétif. Cette augmentation, cohérente avec l'amélioration du rendement grain, reflète une réponse positive des plantes à la hausse de CO_2, qui stimule la photosynthèse. En effet, à des niveaux élevés de CO_2, les plantes en C3 comme le blé augmentent leur capacité à produire de la matière sèche. Ruane et al. (2018) ont souligné que cet effet fertilisant est particulièrement marqué dans les régions où la température reste dans une plage tolérable pour le développement du blé.

Les études sur l'effet du changement climatique futur sur la biomasse sèche du blé s'appuient sur différents scénarios climatiques qui combinent l'élévation des concentrations de CO2 atmosphérique et l'augmentation des températures. Les recherches utilisent des scénarios standardisés incluant des combinaisons de quatre

niveaux de CO2 élevés (+0, +100, +200 et +300 ppm) et quatre niveaux d'augmentation de température (+0, +1, +2, et +3°C) au-dessus des conditions ambiantes actuelles (CO2 ≃390 ppm) (Jaiswal et al., 2018).

Basés sur le scénario RCP8.5, les modèles climatiques prédisent que la concentration atmosphérique de CO2 doublera d'environ 400 ppm à 800 ppm, tandis que les températures moyennes augmenteront entre 1°C et 2,5°C d'ici 2070 . Ces projections sont intégrées dans des études expérimentales utilisant des chambres de croissance contrôlées pour simuler les conditions climatiques attendues en 2070 (Sabella et al., 2020).

À plus grande échelle, des projets internationaux comme (AgMIP) ont développé des scénarios climatiques complets incluant des conditions de base (1980-2010) avec des concentrations de CO2 de 360 ou 550 ppm, des augmentations de température de +2°C ou +4°C, ainsi que des scénarios RCP 8.5 pour les années 2050 et des projections de réchauffement de 1,5°C. et 2,0°C au-dessus des niveaux pré-industriels . Ces différents scénarios climatiques permettent d'évaluer les impacts du changement climatique sur la croissance du blé à travers 60 sites mondiaux sur une période de 30 ans en utilisant 32 modèles de croissance du blé (Liu et al., 2023).

Les projections climatiques révèlent des impacts contrastés mais majoritairement négatifs sur la biomasse aérienne sèche du blé. Les études montrent que la paille pourrait diminuer de 36,9% sous les conditions climatiques futures projetées (Liu et al., 2023), avec des réductions substantiellement enregistrées dans la phénologie, le rendement granaire et la paille sous différents scénarios climatiques (Bisht et al., 2024).Les modèles de croissance du blé qui intègrent les facteurs climatiques, pédologiques, génétiques et de gestion prédisent des variations temporelles importantes dans la paille (Shoukat et al., 2022). Les projections à court et moyen terme indiquent des baisses progressives du rendement grainaire de 5% (2030), 8% (2050-RCP4.5), 12% (2050-RCP8.5), 12% (2070-RCP4.5), et 25% (2070-RCP8.5) par rapport aux conditions de référence, avec une matière sèche suivant une tendance similaire (Zeleke, 2021).

La combinaison de déficit hydrique, émissions et CO2 élevés crée des effets synergiques particulièrement défavorables à la paille. Ces conditions diminuent la photosynthèse foliaire et la conductance stomatique, diminuant ainsi la paille du blé

d'hiver, avec des dommages irréversibles que l'élévation du CO2 ne peut pas compenser (Chang et al., 2023). Le stress thermique et hydrique combiné peut provoquer des baisses de paille jusqu'à 16,4% avec une réduction significative de la surface foliaire fonctionnelle (Fang et al., 2013).

Cependant, certaines études rapportent des résultats plus nuancés, avec des modèles prédisant une augmentation de la production de biomasse et des rendements malgré une diminution de la longueur de la saison de croissance (Ahmed et al., 2019). D'autres recherches montrent que les scénarios futurs peuvent conduire à une augmentation générale des rendements mais avec une légère diminution des valeurs de paille (Bernardoni et al., 2012), illustrant la complexité des interactions entre les différents facteurs climatiques et leurs effets sur la biomasse aérienne du blé.

3.4 Effet du changement climatique futur sur la durée du cycle de croissance du blé

L'étude de Bouras et al. (2019) a montré que le modèle AquaCrop se réfère à trois périodes distinctes : la période de référence 1991-2010, la seconde période 2041-2060, et enfin, la troisième période 2081-2100. Les observations ont démontré une corrélation significative entre la production céréalière et les indices de sécheresse associés à l'état de la végétation durant la phase d'épiaison (mars et avril), lesquels sont liés à la température de surface pendant le stade de croissance en janvier-février, ainsi qu'à l'humidité du sol durant la phase d'émergence en novembre-décembre . La phénologie et les performances des céréales sont projetées jusqu'à la fin du 21e siècle, en se basant sur les données CNRM-2014 extraites d'ALADIN-Climat (modèle régional) pour trois RCPs. Dans un contexte de changement climatique prononcé, et en maintenant les dates de semis actuelles jusqu'en 2050 et 2100, l'augmentation des températures entraînerait une réduction du cycle de culture, provoquant ainsi un décalage dans la phénologie des plantes. Par conséquent, il y aurait une superposition réduite entre la fin du cycle de culture et la saison estivale, généralement marquée par des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse qui devraient se produire plus fréquemment. Ainsi, l'ébullition déclenchée par les températures élevées ne serait pas aussi fréquente que prévu, et la restriction d'eau accumulée serait également moindre. Néanmoins, en raison de cette anticipation, on pourrait prévoir des conséquences

émergentes liées à l'impact néfaste des basses températures pendant la méiose et à la réduction de la lumière solaire au début de l'allongement de la tige.

Des hivers doux entraîneraient également une réduction du nombre de jours de vernalisations, limitant ainsi les besoins en froid durant la période de tallage. Cette étude illustre l'application de modèles bioclimatiques pour analyser les changements prévus de la phénologie des cultures d'ici la fin du siècle, sous l'influence des principaux facteurs climatiques environnementaux (Beauvais et al., 2019). Dans le nord-ouest du Maroc, le modèle Aquacrop a démontré une tendance notable à la réduction des valeurs moyennes du cycle de croissance pour la période intermédiaire 2040-2050. Cependant, c'est le scénario RCP 4.5 qui a prévu la plus grande diminution à court terme, soit 15 jours. Le modèle a prédit, sous le scénario RCP 8.5, une réduction du cycle de culture de 13 jours (Halima et al., 2021).

3.5 Adaptation du blé au changement climatique futur par la sélection d'une date optimal pour le semis

Une stratégie de semis fondée sur une date fixe ne semble pas avantageuse pour la culture du blé dur pour deux raisons principales. Premièrement, elle ne permet pas de tirer parti des conditions hydriques supposées être optimales au début de l'automne. Deuxièmement, elle entraîne un raccourcissement significatif du cycle de culture pendant la phase végétative, ce qui conduit à une diminution de la matière sèche accumulée. En revanche, une stratégie de semis à date dynamique permet une prolongation de la phase reproductive tout en réduisant la phase végétative, avec un cycle abrégé de seulement 15 jours. Bien que la quantité totale de matière sèche soit moindre, l'équilibre hydrique, facilité par un semis anticipé, demeure bénéfique. Ainsi, le rendement dans le climat futur probable reste équivalent à celui de la situation actuelle. Ces résultats offrent aux gestionnaires une approche de semis basée sur une date dynamique, visant à relever les défis posés par le changement climatique et son impact sur la culture du blé dur. Outre les réponses agronomiques liées à la culture du blé dur face aux changements climatiques, l'étude fournit des indications sur la manière dont une gestion judicieuse de la date de semis pourrait être mise en œuvre pour maintenir des rendements comparables à ceux actuels ; elle offre ainsi des outils aux gestionnaires et aux organisations d'assistance agricole pour guider les agriculteurs face aux défis alimentaires futurs. Avec des prévisions indiquant une probable augmentation

des précipitations estivales dans le futur, il pourrait être pertinent d'explorer d'autres méthodes agricoles telles que le paillage et/ou l'ensemencement direct afin de maximiser la rétention d'humidité du sol (Chourghal et Hartani, 2020).

4. Limites de l'étude

L'utilisation d'une seule zone, imposant ainsi une limitation spatiale et régionale, pose des problèmes significatifs, car les régions semi-arides abritent divers microclimats et conditions environnementales susceptibles d'affecter considérablement les résultats de la production de blé.

Limites des modèles climatiques : Cette étude repose généralement sur un nombre restreint de modèles de circulation générale, utilisant 11 modèles distincts. Les prévisions de rendement sont fortement influencées par la sélection des scénarios d'émission (tels que SSP 1.9, SSP4.5, SSP 8.5) et les périodes temporelles associées. Espèce de culture et limitations génétiques : Un des principaux inconvénients dans la modélisation de l'impact du changement climatique sur le blé réside dans le nombre limité d'espèces de cultures utilisées dans cette étude, qui se concentrent généralement sur seulement deux cultivars (Oued el Bared, El Wifek). Méthodologie et limites techniques : cette étude vise généralement à calibrer et valider un modèle à l'aide de données de terrain limitées couvrant seulement 3 saisons de croissance, ce qui peut ne pas refléter la totalité des variations climatiques nécessaires pour des projections solides. Cette brève période de calibration pose un problème particulier dans les régions semi-arides où la variabilité climatique interannuelle est forte et peut avoir un impact considérable sur la performance du modèle, d'autant plus que seul le modèle de culture AquaCrop est utilisé.

Une autre contrainte concerne les scénarios SSP créés par le GIEC/IPCC, qui démontrent des moyennes au niveau global. Cette approche ne prend pas en compte les fluctuations potentielles de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère à l'échelle locale ou régionale. De même, l'impact fertilisant du CO_2, soutenu par le modèle, peut être influencé par d'autres facteurs restrictifs tels que les limitations hydriques, la disponibilité des nutriments du sol et les conditions thermiques extrêmes. Ainsi, les améliorations attendues en matière d'efficacité, de biomasse et de productivité hydrique dans cette recherche doivent être abordées avec prudence, car elles comportent un degré

d'incertitude dépendant des suppositions établies sur le niveau futur du CO_2 atmosphérique.

Pour les recherches à venir, il serait bénéfique d'étendre la portée spatiale en recourant à des études multi régionales, d'associer plusieurs modèles climatiques en appliquant une réduction dimensionnelle de haute résolution, et d'examiner une diversité de ressources génétiques du blé dans le but de développer des approches d'adaptation climatique. Il faut adapter les prévisions climatiques globales aux conditions agricoles spécifiques (RCM) dans les zones semi-arides. Par ailleurs, il est nécessaire de calibrer les études sur une durée prolongée, d'adopter une démarche pluri-modèle et d'instaurer des actions d'ajustement pour perfectionner les prévisions.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Cette étude offre une perspective globale et quantifiée des impacts futurs du changement climatique sur la région semi-aride de Sétif, en intégrant l'évolution des facteurs climatiques et les réponses des cultures de blé dur (BD) et de blé tendre (BT). Concernant le climat, d'ici 2050, les projections du GIEC (SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5) prévoient : Une augmentation des températures moyennes annuelles de +3,2 °C (SSP1-1.9) à +4,5 °C (SSP5-8.5), par rapport à la période de référence (1995–2014). Selon le scénario SSP5-8.5, une réduction de l'humidité relative pouvant atteindre -13 % (de 76 % à 63 %). Une augmentation de la vitesse moyenne du vent de 2,85 m/s (PR) à 4,0 m/s (SSP5-8.5). Le rayonnement solaire annuel augmenterait de 1475 MJ/m² (PR) à environ 1560 MJ/m² (SSP5-8.5). Une hausse de l'évapotranspiration annuelle, passant de 1555 mm (PR) à plus de 1595 mm (SSP5-8.5). Selon le scénario SSP5-8.5, la concentration de CO_2 pourrait atteindre 615 ppm, comparativement à 380 ppm en mode PR. D'un point de vue agronomique, les modélisations effectuées avec AquaCrop indiquent que : La production de blé dur augmente de 6 quintaux/ha (PR) à 28,78 quintaux/ha en 2050 selon SSP5-8.5, soit une hausse de +385 %. Sous le scénario SSP5-8.5, la biomasse du blé dur passe de 13,17 quintaux par hectare à 39,38 quintaux par hectare. La productivité en eau du blé dur a plus que quintuplé, passant de 0,15 kg/m³ à 0,84 kg/m³. Sous le scénario SSP5-8.5, la productivité du blé tendre, initialement de 7,4 q/ha (PR), grimpe à 15,5 q/ha en 2050, soit une multiplication par deux. La biomasse du blé tendre passe de 14 quintaux par hectare (PR) à 28,86 quintaux par hectare. Sa productivité en matière d'eau a également évolué, augmentant de 0,15 kg/m³ à 0,53 kg/m³. Ces prévisions soulignent la possibilité d'améliorer la sécurité alimentaire au niveau local, à condition d'adopter des stratégies d'adaptation efficaces : modification des dates de plantation, choix de variétés résistantes, méthodes de conservation de l'eau et soutien technique spécifique pour les agriculteurs. En conclusion, malgré les tensions climatiques prévues, la capacité d'adaptation de l'agriculture à Sétif demeure significative. Il est crucial d'intégrer les résultats des modélisations dans les politiques agricoles et l'aménagement régional pour garantir une résilience durable face aux défis climatiques futurs.

Cette recherche a permis d'apprécier l'effet possible du changement climatique sur la culture du blé dur et du blé tendre dans la zone semi-aride de Sétif pour les années 2030

et 2050, en se servant du modèle AquaCrop associé aux prévisions climatiques tirées des scénarios SSP1-1.9, SSP2-4.5 et SSP5-8.5 du GIEC.

Les données climatiques montrent une montée graduelle de la température atmosphérique, du rayonnement solaire, de la rapidité du vent et de l'évapotranspiration de référence, corrélée à une baisse de l'humidité relative et des précipitations. Ces modifications indiquent une aggravation des conditions météorologiques qui pourraient augmenter les demandes en eau des cultures et transformer les équilibres agroécologiques des systèmes de culture de céréales dans les zones semi-arides.

En dépit de l'aggravation des conditions climatiques, les simulations effectuées avec AquaCrop démontrent un progrès des performances agricoles pour le blé dur et le blé tendre selon les nombreux scénarios examinés. Cette progression positive se manifeste par une hausse du rendement, de la paille et de l'efficacité hydrique. Ces observations indiquent que l'impact fertilisant de l'accroissement de la teneur atmosphérique de CO_2 pourrait atténuer en partie les conséquences défavorables du réchauffement global et aider à optimiser l'efficacité de l'usage de l'eau par les plantes.

Cependant, il faut faire preuve de prudence dans l'interprétation de ces projections. Les réponses fictives sont basées sur diverses suppositions concernant les futurs scénarios climatiques, l'évolution des niveaux de CO_2 dans l'atmosphère et la structure intrinsèque du modèle AquaCrop. En outre, les impacts possibles liés aux maladies, aux nuisibles, aux déficits nutritionnels, aux phénomènes climatiques extrêmes et aux fluctuations régionales du CO_2 atmosphérique n'ont pas été spécifiquement considérés.

L'aspect novateur de cette étude est l'incorporation des prévisions climatiques récentes du GIEC dans la modélisation des performances du blé dur et du blé tendre dans un environnement semi-aride appelé « Sétif ». Les conclusions tirées fournissent un fondement scientifique important pour façonner les plans d'ajustement de l'agriculture en réponse aux évolutions climatiques futures et participer à la sauvegarde de la sécurité alimentaire du pays.

Pour le futur, il existe des nombreuses perspectives prometteuses d'exploiter Aquacrop pour prédire les rendements, la biomasse sèche et productivité de l'eau du blé :

- ✓ Évaluer l'impact de différentes pratiques agricoles (irrigation complémentaire, fertilisation, rotations culturales).
- ✓ Tester des variétés de blé plus tolérantes au stress thermique et hydrique.
- ✓ Coupler les résultats agronomiques avec des analyses socio-économiques pour appuyer la prise de décision des acteurs agricoles
- ✓ Étendre l'analyse à d'autres régions semi-arides afin de comparer les réponses agricoles face au changement climatique.
- ✓ Intégrer un plus grand nombre de modèles climatiques et de scénarios pour réduire les incertitudes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

1. Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resources Management*, *29*(8), 2837-2853. https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3

2. Ahmim, M., & Labiod, A. (2020). New Data on the Current Distribution of Barbary Macaque Macaca sylvanus (Mammalia : Cercopithecidae) in Algeria. *Am. J. Life Sci*, *8*, 47-52.

3. Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., & Chung, E.-S. (2019). Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(11), 4803-4824.

4. Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, *4*, 455-475.

5. 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

6. Andarzian, B, Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, *100*(1), 1-8. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377411002307

7. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., ...& Reynolds, M. P. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology, 25*(1), 155–173. https://doi.org/10.1111/gcb.14481

8. Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F., & Papy, F. (1998). Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole : La constitution de systèmes de culture du Bassin Parisien. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 25-43.

9. Baroudi, M., El Zerey, W., & Bouiadjra, S. B. (2016). *Impact of climatic variability on durum wheat (Triticum durum L.) yields in North Western of Algeria*. International Journal of Environment, 5(1), 107–120. https://www.researchgate.net/publication/2956860799

10. Beauvais, F., Cantat, O., Madeline, P., Le Gouée, P., Brunel-Muguet, S., & Medjkane, M. (2019). Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100?-Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie*, *16*, 129-160.

11. Beauvais, F., Cantat, O., Madeline, P., Le Gouée, P., Brunel-Muguet, S., & Medjkane, M. (2019). Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100?-Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie*, *16*, 129-160.

12. Bekkis, S. (2023). *Quelle stratégie pour l'atténuation de la dépendance alimentaire de l'Algérie des marches externes : Cas des blés* [PhD Thesis]. http://dspace.ensa.dz:8080/jspui/handle/123456789/3560

13. Bekkis, S., Benmehaia, A. M., & Ahcène, K. (s. d.). *Impact of agricultural policies on the evolution of domestic wheat availability : A quantitative study Impact des politiques agricoles sur l'évolution des disponibilités nationales en blé: Une étude quantitative*. Consulté 7 décembre 2024, à l'adresse https://www.researchgate.

14. Belkhiri, F. E., Semiani, M., & Heng, L. (2019). Calibration du modèle FAO AquaCrop pour la culture du blé en conditions méditerranéennes. *Recherche Agronomique*, *18*(1), 23-44.

15. Benhamiche, N., Madani, K., & Laignel, B. (2014). Impact of Climate Changes on Water Resources in Algeria. In M. Behnassi, M. Syomiti Muteng'e, G. Ramachandran, & K. N. Shelat (Éds.),

Vulnerability of Agriculture, Water and Fisheries to Climate Change (p. 193-205). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8962-2_12

16. Bernardoni, E., Acutis, M., & Ventrella, D. (2012). Long-term durum wheat monoculture : Modelling and future projection.

17. Birch, E. L. (2014). A Review of "Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability" and "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change": Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). New York, NY: Cambridge University Press. 2,621 pages. Available online at http://ipcc-wg2.gov/AR5/report/final-drafts/; Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). (Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). New York, NY: Cambridge University Press. 1,967 pages. Available online at https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/. *Journal of the American Planning Association*, *80*(2), 184-185. https://doi.org/10.1080/01944363.2014.954464

18. Bisht, H., Punia, S., Kumar, B., Rajput, J., Singh, D. K., Vishnoi, L., Singh, R. N., Tamta, M., & Gautam, S. (2024). Impacts of climate change on phenology, yield, and water productivity of wheat in a semi-arid region of India using the CERES-Wheat model. *Journal of Water and Climate Change*.

19. Bouaoune, D., & Dahmani-Megrerouche, M. (2010). Climatic data reconstitution of North Algeria: application of neural network method. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(11), 815–822.

20. Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., & Ghattas, J. (2018). *IPCC DDC : IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical*. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6CMIPICLhi

21. Bougma, L. A., Ouédraogo, M. H., Sawadogo, N., Sawadogo, M., Balma, D., & Vernooy, R. (2018). Perceptions paysannes de l'impact du changement climatique sur le mil dans les zones sahélienne et soudanosahélienne du Burkina Faso. *Afrique Sciences*, *14*(4), 264-275.

22. Bouras, E., Jarlan, L., Khabba, S., Er-raki, S., Dezetter, A., Sghir, F., & Tramblay, Y. (2019). Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*.

23. Bouras, E. (2021). Besoin en eau et rendements des céréales en Méditerranée du Sud : Observation, prévision saisonnière et impact du changement climatique [PhD Thesis, Toulouse 3]. https://theses.fr/2021TOU30150

24. Bouregaa, T., & Fenni, M. (2013). Projected Changes in Annual Temperature and Precipitation in Setif High Plains Region (North East of Algeria). *International Journal of Science and Engineering Investigations*, *2*(17).45-48.

25. Bousquet, F., Le Page, C., & Müller, J.-P. (2002). Modélisation et simulation multi-agent. *deuxiemes assises du GDRI3*, 26.

26. Brisson, N., Wéry, J., & Boote, K. (2006). Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. *Working with Dynamic Crop Models, Elsevier, Amsterdam*, 257-279. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=nG7DEXen9QAC&oi=fnd&pg=PA257&dq=contribution+of+agrom%C3%A9t%C3%A9orologie+of+crop+production+and+it+application+,+Hoogenboom&ots=IYXsomjTFr&sig=l2RcmRCYUaDpqxCiYTft_-djmPA

27. Camara, M., Diedhiou, A., Sow, B. A., Diallo, M. D., Diatta, S., Mbaye, I., & Diallo, I. (2013). Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, *24*(1), 14-28.

28. Chabane, M. (2010). Le réchauffement climatique menace la sécurité alimentaire : Quelle vision et quelle politique pour l'avenir en Algérie. 6ème Colloque International: Stratégies de Développement, Quel Chemin Parcouru. https://www.academia.edu/download/4660860/LE_RECHAUFFEMENT_CLIMATIQUE_MENACE_LA_SECURITE_ALIMENTAIRE_._QUELLE_VISION_ET_QUELLE_POLITIQUE_POUR_L_AVENIR_EN_ALGERIE.pdf

29. Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Slingo, J. M., & Grimes, D. I. F. (2004). Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and*

meteorology,124(1-2),99-120.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192304000085

30. Chang, Z., Hao, L., Lu, Y., Liu, L., Chen, C., Shi, W., Li, Y., Wang, Y., & Tian, Y. (2023). Effects of elevated CO2 concentration and experimental warming on morphological, physiological, and biochemical responses of winter wheat under soil water deficiency. *Frontiers in Plant Science*.

31. Chebil, A., Mtimet, N., & Tizaoui, H. (2011). Impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie). African Journal of Agricultural and Resource Economics, 6(2). https://ageconsearch.umn.edu/record/156981/

32. Chennafi, H., Aïdaoui, A., Bouzerzour, H., & Saci, A. (2006). Yield response of durum wheat (Triticum durum Desf.) cultivar waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20063212609

33. Chetioui, C., & Bouregaa, T. (2024). Temperature and precipitation projections from CMIP6 for the Setif high plains in Northeast Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 17(2), 63. https://doi.org/10.1007/s12517-024-11854-2

34. Chourghal, N., & Hartani, T. (2020). Quelle stratégie de semis du blé dur en Algérie pour s' adapter au changement climatique? *Cahiers Agricultures*, *29*, 22.

35. Chourghal, N., & Huard, F. (s. d.). Stratégies d'adaptations de la culture du blé dur face aux changements climatiques futurs en Algérie : 1-Gestion des semis. Bari-Chania-Montpellier-Zaragoza, 54.

36. Christensen, J. H., Carter, T. R., Rummukainen, M., & Amanatidis, G. (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models : The prudence project. Climatic Change, 81(S1), 1-6. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9211-6

37. Colin, J., Déqué, M., Radu, R., & Somot, S. (2010). Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations : Influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, *62*(5), 591. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x

38. Consortium, E.-E. (2019). EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 CMIP. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6_4416515

39. Council, N. R., Earth, D. on, Studies, L., Sciences, B. on A., & Concentrations, C. on S. T. for A. G. G. (2011). Climate stabilization targets : Emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia. National Academies Press. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=0j9VfGJ9hvQC&oi=fnd&pg=PR1&dq=(National+Research+Council+(NRC)+(2011).+Climate+Stabilization+Targets:+Emissions,+Concentrations,+and+Impacts+over+Decades+to+Millennia.+The+National+Academies+Press,+Washington,+DC,+USA.&ots=EgKo-L0_rM&sig=IAdIPJrZdpqLsttDqfO2cBfaT88

40. Dhakal, K., Kakani, V., & Linde, E. (2018). Climate Change Impact on Wheat Production in the Southern Great Plains of the US Using Downscaled Climate Data.

41. David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., & Dorsainvil, F. (2004). Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy*, *21*(2), 249-266. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030103001023

42. De la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., & Martínez, J. (2013). *Aquacrop model calibration in potato and its use to estimate yield variability under field conditions*. https://www.scirp.org/html/14-4700177_34087.htm

43. Dekkaki, M., Amssa, M., & Qariani, L. (2000). Identification des critères agrophysiologiques d'adaptation du blé dur aux basses températures et à la sécheresse. *Durum wheat improvement in the Mediterranean region*, 245-249.

44. Demirel, M.C.; Mai, J.; Mendiguren, G.; Koch, J.; Samaniego, L.; Stisen, S. Combining Satellite Data and Appropriate Objective Functions for Improved Spatial Pattern Performance of a Distributed Hydrologic Model. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018, 22, 1299–1315.

45. Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R., & Pielke, R. (2009). Do We Need Better Predictions to Adapt to a Changing Climate? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *90*(13), 111-112. https://doi.org/10.1029/2009EO130003

46. De Wit, C. T., & Rabbinge, R. (1979). Systems analysis and dynamic simulation. *EPPO Bulletin*, *9*, 149-153. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/198147

47. De Wit, C. de, Brouwer, R., & De Vries, F. P. (1970). The simulation of photosynthetic systems. *Proceedings of the IBP/PP technical meeting, Trebon, 14-21 September 1969*, 47-70. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/198106

48. Djaouti, M. (2010). *Renforcement des capacités des acteurs de la filière céréales en Algérie dans le cadre d'un partenariat Nord-Sud : Cas de la wilaya de Sétif* (Master of Science, n° 106). Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes – Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (CIHEAM-IAMM), Montpellier,France

49. Djellouli, Y., & Saci, A. (2003). Catastrophe «naturelle» : Les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, *23*, 236-https://www.nature.com/articles/nclimate1763

50. Djennane, A. M. (1993). Quelques résultats du programme de vulgarisation de l'intensification céréalière dans la région des Hautes Plaines Sétifiennes. *Cahiers Options Méditerranéennes*, *2*(1), 99-112. http://om.ciheam.org/om/pdf/c02-1/93400078.pdf

51. Djomo, M. T. (2007). ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET FORETS TROPICALES DU CAMEROUN : VERS UN DIAGNOSTIC POLITIQUE COMPARE DES REGIONS DU CENTRE ET DU SUD-OUEST ET UNE EVALUATION MULTI-ACTEURS DES VULNERABILITES SOCIALES. Consulté 30 décembre 2024, à l'adresse https://www.researchgate.net/profile/Maximilien-Tiogang- ities.pdf

52. Dong, Q., Wang, W., Shao, Q., Xing, W., Ding, Y., & Fu, J. (2019). The response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China : Historical changes, driving forces, and future projections. *International Journal of Climatology*.

53. Dubey, S. K., & Sharma, D. (2018). Assessment of climate change impact on yield of major crops in the Banas River Basin, India. *Science of The Total Environment*, *635*, 10-19. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718311033

54. Durand-Dastès, F. (1986). Climat et production agricole : L'évolution des douze dernières années à l'échelle mondiale. *Géocarrefour-Revue de géographie de Lyon*, *61*(3), 259-269.

55. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Agrawala, S., Bashmakov, I. A., Blanco, G., Broome, J., Bruckner, T., Brunner, S., & Bustamante, M. (2014). *Summary for policymakers*. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11125/

56. El-Rawy, M., Batelaan, O., Al-Arifi, N., Alotaibi, A., Abdalla, F., & Gabr, M. (2023). Climate Change Impacts on Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions : A Case Study in Saudi Arabia. *Water*.

57. Fakana, S. T. (2020). Causes of climate change. Global Journal of Science Frontier Research, 20, 7-12.https://www.researchgate.net/profile/SelemonFakana/publication/342452772_Causes_of_Climate_Change_Review_Article/links/5ef4ff3092851c52d6fdb650/Causes-of-Climate-Change-Review-Article.pdf

58. Fang, S., Su, H., Liu, W., Tan, K., & Ren, S. (2013). Infrared Warming Reduced Winter Wheat Yields and Some Physiological Parameters, Which Were Mitigated by Irrigation and Worsened by Delayed Sowing. *PLoS ONE*.

59. *Faostat*. (2024). https://www.fao.org/faostat/fr/data/QCL.

60. Faye, A., Ndiaye, M., & Ndiaye, A. (2018). L'impact des changements climatiques sur les rendements des principales cultures céréalières au Sénégal. *Revue Internationale des Economistes de Langue Française: revue de l'Association Internationale de Economistes de Langue Française avec la collaboration Université des Sciences Economiques et de Gestion*, *3*(2), 291-306.

61. Fenni, M. (2013). Impacts of Climate Change on Cereal Production in the Setif High Plains (North-East of Algeria). In I. Dincer, C. O. Colpan, & F. Kadioglu (Éds.), *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming* (p. 225-231). Springer

New York. https://doi.org/10.1007/978-1- Gari, A. T., Getnet, M., & Nigatu, L. (2019). Modeling Climate Change Impacts on Bread Wheat (Triticum aestivum L.) Production in Central Highlands of Ethiopia. *Journal of Agricultural Science and Food Research*.

62. Gautron, R., Padrón, E. J., Preux, P., Bigot, J., Maillard, O.-A., & Emukpere, D. (2022). *gym-DSSAT : A crop model turned into a Reinforcement Learning environment* (arXiv:2207.03270). arXiv. http://arxiv.org/abs/2207.03270

63. Ghio, D., Goujon, A., Natale, F., Alfredo, A., & Petroliagkis, T. (2023). Assessing populations exposed to climate change : A focus on Africa in a global context. *Population and environment*.

64. Goodarzi, M., Mahdian, M. H., & Qermezcheshmeh, B. (2021). Assessment of climate change using SDSM downscaling Model (A case study : West of Iran). *Water Harvesting Research*, *4*(1), 29-39. https://jwhr.birjand.ac.ir/article_1757.html

65. Gopalakrishna, D., Schroeder, J., Huff, A., Thomas, A., & Leibrand, A. (2013). *Planning for Systems Management & Operations as part of Climate Change Adaptation*. United States. Federal Highway Administration. Office of Operations. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41922

66. Guechgal, M. (2021). *Impact du changement climatique sur le rendement du blé dur dans la wilaya de TIARET* [PhD Thesis, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie]. http://dspace.univ-tiaret.dz/handle/123456789/6780

67. Guivarch, C., & Rozenberg, J. (2013). Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique. *Pollution atmosphérique: climat, santé, société*, 1-9. https://shs.hal.science/halshs-01053730/

68. Hale, G. A., Cox, R. D., & Ritchie, G. (2023). Canopy detection beyond the field : Colored backgrounds impact precision of Canopeo. *Sensing and Bio-Sensing Research*, *42*, 100587. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214180423000399

69. Halima, O. I., Iaaich, H., Kerfati, A., Moussadek, R., Mazen, N., & Jnad, I. (2021). Application du modèle FAO-AquaCrop à l'évaluation de l'impact des changements

climatiques sur la productivité du blé dans la zone pluviale de Zaer. *African and Mediterranean Agricultural Journal-Al Awamia*, *133*, 170-187.

70. Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science, 10*, 103. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103

71. Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *83*(8), 1149-1166. https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/83/8/1520-0477-83_8_1149.xml

72. Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, *101*(3), 488-498. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs

73. Hoogenboom, G. (2000). Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and forest meteorology*, *103*(1-2), 137-157.

74. Houghton J.T, Jenkins G.J and Ephraumis J.J.(1990).Braman, L. M., Suarez, P., & Van Aalst, M. K. (2010). Climate change adaptation : Integrating climate science into humanitarian work. *International Review of the Red Cross*, *92*(879), 693-712. https://www.cambridge.org/core/journals/international-review-of-the-red-cross/article/climate-change-adaptation-integrating-climate-science-into-humanitarian-work/37AED9F5889C8BEBB1267C37CC698A65

75. Houghton, J. T. (1996). *Climate change 1995 : The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 2). Cambridge University Press. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=k9n8v_7foQkC&oi=fnd&pg=PP9&dq=Houghton+J.T,+Meira+Filho,+L.G,+Callander+B.A,+Harris+N,+Kattenberg+A+and+Maskell+K.,+1996).+The+Science+of+Climate+Change.+Contribution+of+Working+Group+I+to+the+Second+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change.+Press+Syndicate+of+the+University+of+Cambridge.&ots=OCVJTEsOp3&sig=0-4ZfjrGIu9GkWjILFH7oQLEJJY

76. Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water : III.

Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, *101*(3), 448-459. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s

77. Hulme, M., & Carter, T. R. (1999). Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies (Proc. ECLAT-2 Helsinki Workshop, 14-16 April, 1999 (Eds. T. Carter, M. Hulme and D. Viner). 128pp Climatic Research Unit, Norwich, UK*, 11-37.

78. Hulme, M., & Mahony, M. (2010). Climate change : What do we know about the IPCC? *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *34*(5), 705-718. https://doi.org/10.1177/0309133310373719

79. Hussein, F., Janat, M., & Yakoub, A. (2011). Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *9*(4), 1319-1330. https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/view/2435

80. Hussain, J., Khaliq, T., Rahman, M. H. ur, Ullah, A., Ahmed, I., Srivastava, A., Gaiser, T., & Ahmad, A. (2021). Effect of Temperature on Sowing Dates of Wheat under Arid and Semi-Arid Climatic Regions and Impact Quantification of Climate Change through Mechanistic Modeling with Evidence from Field. *Atmosphere*.

81. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

82. Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., &del Rio, S. (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. *Agricultural Water Management*, *135*, 61-72. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377413003557

83. Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani Moghadam, J. (2021). Examination of Various Feature Selection Approaches for Daily Precipitation Downscaling in Different Climates. *Water Resources Management*, *35*(2), 407-427. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02701-6

84. Jaiswal, S., Kumar, A., & Gupta, U. (2018). Simulation of Wheat Growth and Yield under Ambiance Change Impacts on Crop in Eastern India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*.

85. Jeuffroy, M.-H., Barré, C., Bouchard, C., Demotes-Mainard, S., Devienne-Barret, F., Girard, M. L., & Recous, S. (1998). Fonctionnement d'un peuplement de blé en conditions de nutrition azotée sub-optimale. *Fonctionnement des peuplements vegetaux sous contraintes environnementales*, *93*. https://hal.science/hal-02768781/

86. Jeuffroy, M.-H., & Recous, S. (1999). Azodyn : A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European journal of Agronomy*, *10*(2), 129-144. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030198000598

87. Jin, X., Feng, H., Zhu, X., Li, Z., Song, S., Song, X., Yang, G., Xu, X., & Guo, W. (2014). Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain. *PloS one*, *9*(1), e86938.

88. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, *18*(3-4), 235-265. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102001077

89. Kale, S., & Madenoğlu, S. (2018). Evaluating AquaCrop model for winter wheat under various irrigation conditions in Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*, *24*(2), 205-217.

90. Karandish, F., Nouri, H., & Schyns, J. (2021). Agricultural Adaptation to Reconcile Food Security and Water Sustainability Under Climate Change : The Case of Cereals in Iran. *Earth's Future*.

91. Kataoka, T., Tatebe, H., Koyama, H., Mochizuki, T., Ogochi, K., Naoe, H., Imada, Y., Shiogama, H., Kimoto, M., & Watanabe, M. (2020). Seasonal to Decadal Predictions With MIROC6 : description and Basic Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *12*(12), e2019MS002035. https://doi.org/10.1029/2019MS002035

92. Karima, Y., Dhamna, S., & Toumi, M. (2020). Contribution to the floristic and ethnobotanic study of the most utilized medicinal plants in the Sétifian Tell (south of the Tamentout forest) east Algeria. *Mediterranean Botany*, *41*(1), 55.

93. Kavya Shree, K. (2016). A study on the impact of climate change on the productivity and women employment in coffee and tea plantations in India. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *5*(8), 2319-7064.

94. Kheir, A., Govind, A., Nangia, V., Devkota, M., Elnashar, A., Omar, M. E. D., & Feike, T. (2024). Developing automated machine learning approach for fast and robust crop yield prediction using a fusion of remote sensing, soil, and weather dataset. *Environmental Research Communications*.

95. Khila, S. B., Douh, B., Mguidiche, A., & Boujelben, A. (2015). Effets de la contrainte hydrique et des changements climatiques sur la productivité du blé dur en conditions climatiques semi arides de Tunisie. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, *23*, 69-85. http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/292

96. Khordadi, M. J., Olesen, J., Alizadeh, A., Mahallati, M., Ansari, H., & Sanaeinejad, H. (2019). CLIMATE CHANGE IMPACTS AND ADAPTATION FOR CROP MANAGEMENT OF WINTER WHEAT AND MAIZE IN THE SEMI-ARID REGION OF IRAN. *Irrigation and Drainage*.

97. Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., & Shahidi, A. (2014). *Comparison of FAO aquacrop and SWAP agro-hydrological models to simulate water and salt transport during growing season of winterwheat.*https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=68b25a4736f24c05e8a0d6e3c13f5f052649a2ee

98. Khorsand, A., Dehghanisanij, H., Heris, A. M., Asgarzadeh, H., & Rezaverdinejad, V. (2024). Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (Brassica napus) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. *Applied Water Science*, *14*(3), 56. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02108-3

99. Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature climate change*, *3*(4), 369-373. https://www.nature.com/articles/nclimate1716

100. Kouadio, L., Boubaker, H., Djaby, B., & Meddi, M. (2020). Climate change impact on wheat production and water use in North Africa: A modeling perspective. *Agricultural Water Management, 240*, 106313. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106313

101. Kouame, K. F. C. (2024). un Approche de la prévision des crues fluviales à partir d'une modélisation hydrologique : Cas du modèle GR4J appliqué au bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). *Espace Géographique et Société Marocaine*, *1*(83). https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/download/46955/24827

102. Kouassi, K. L., N'Go, Y. A., & Savane, I. (2015). Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : Contribution des chaînes de Markov. *Cahiers Agricultures*, *24*(3), 186-197. https://www.cahiersagricultures.fr/articles/cagri/abs/2015/03/cagri2015243p186/cagri2015243p186.html

103. Kourat, T. (2021). Évaluation du changement climatique et impact sur la production du blé dur pluvial dans les Hautes plaines orientales de l'Algérie [PhD Thesis].

104. Kourougli, S., & Aït Ouali, A. (2010). Etude de l'effet des trois systèmes de culture et du précédent cultural sur le comportement du sol et de la culture de blé tendre (Triticum aestivum, L.). *Mémoire d'ingénieur d'état; Département des Sciences Agronomiques, UFAS Sétif: Sétif, Algerie*.

105. Krasting, J. P., Blanton, C., McHugh, C., Radhakrishnan, A., John, J. G., Rand, K., Nikonov, S., Vahlenkamp, H., Zadeh, N. T., & Dunne, J. P. (2018). *NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 C4MIP esm-ssp585*. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6_4830956

106. Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H., & Wilbanks, T. (2012). The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis : A new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, *22*(4), 807-822. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012000593

107. Lazreg, B. (2016). *Impact du changement climatique sur la production agricole en Algérie* [PhD Thesis, Université IBN-KHALDOUN-Tiaret-Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie]. https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=000000000000007034400000087&pub=1

108. Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., Wang, M. X., & Wasson, J. (1992). Emissions scenarios for the IPCC : An update. *Climate change*, *1040*, 75-95. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=40b8a5ba6902ac1be8575606ba7faef0ba209575

109. Lemaire, G. (Éd.). (1997). *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7

110. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, *529*(7584), 84-87. https://www.nature.com/articles/nature16467

111. Lhomme, J.-P., Mougou, R., & Mansour, M. (2009). Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Climatic Change*, *96*(4), 549-564.

112. Li, L. (2019). CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *(No Title)*. https://cir.nii.ac.jp/crid/1883961342683013504

113. Lin, C.Y.; Tung, C.P. (2017). Procedure for Selecting GCM Datasets for Climate Risk Assessment. Terr. Atmos. Ocean. Sci .28, 43–55.

114. Liu, B., Martre, P., Ewert, F., Webber, H., Waha, K., Thorburn, P., Ruane, A., Aggarwal, P., Ahmed, M., Balkovič, J., Basso, B., Biernath, C., Bindi, M., Cammarano, D., Cao, W., Challinor, A., Sanctis, G., Dumont, B., Espadafor, M., …Asseng, S. (2023). AgMIP-Wheat multi-model simulations on climate change impact and adaptation for global wheat. *Open Data Journal for Agricultural Research*.

115. Loyce, C., Rellier, J. P., & Meynard, J. M. (2002). Management planning for winter wheat with multiple objectives (1) : The BETHA system. *Agricultural Systems*, *72*(1), 9-31.

116. Lutz, A.F.; ter Maat, H.W.; Biemans, H.; Shrestha, A.B.; Wester, P.; Immerzeel, W.W. (2016).Selecting Representative Climate Models for Climate Change Impact Studies: An Advanced Envelope-Based Selection Approach. Int. J. Climatol, 36, 3988–4005.

117. Maniruzzaman, M., Talukder, M. S. U., Khan, M. H., Biswas, J. C., & Nemes, A. (2015). Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, *159*, 331-340. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377415300391

118. Mansour, H. A., Gaballah, M. S., & Nofal, O. A. (2020). Evaluating the water productivity by Aquacrop model of wheat under irrigation systems and algae. *Open Agriculture*, *5*(1), 262-270. https://doi.org/10.1515/opag-2020-0029

119. Matari, A. (2007). *SECHERESSE EN ALGERIE*. http://drought.free.fr/livre/Matari.pdf

120. McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM : A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural systems*, *50*(3), 255-271. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308521X9400055V

121. Megherbi, A., Mehdadi, Z., Toumi, F., Moueddene, K., & Bouadjra, S. E. B. (2012). Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale). *Acta Botanica Gallica*, *159*(1), 137-143. https://doi.org/10.1080/12538078.2012.673824.

122. Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020). Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*, *12*(2), 482. https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/482

123. Mhizha, T., Geerts, S., Vanuytrecht, E., Makarau, A., & Raes, D. (2014). Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA*, *40*(2), 233-244. https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/102216

124. Mirgol, B., & Nazari, M. (2018). Possible Scenarios of Winter Wheat Yield Reduction of Dryland Qazvin Province, Iran, Based on Prediction of Temperature and Precipitation Till the End of the Century. *Climate*.

125. Mirgol, B., Nazari, M., & Eteghadipour, M. (2020). Modelling Climate Change Impact on Irrigation Water Requirement and Yield of Winter Wheat (Triticum aestivum L.), Barley (Hordeum vulgare L.), and Fodder Maize (Zea mays L.) in the Semi-Arid Qazvin Plateau, Iran. *Agriculture*.

126. Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, *110*, 16-24. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412000959

127. Mo, X.-G., Hu, S., Lin, Z.-H., Liu, S.-X., & 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. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927816300958

128. Mohammadi, M. H., Shafaie, V., Samani, A. N., Garizi, A. Z., & Rad, M. M. (2024). Assessing Future Hydrological Variability in a Semi-Arid Mediterranean Basin : Soil and Water Assessment Tool Model Projections under Shared Socioeconomic Pathways Climate Scenarios. *Water*.

129. Mohammed, B. S., & Salima, A. (s. d.). *Analyse technico-économique des systèmes de conversion d'énergie éolienne-région de Sétif*. Consulté 8 juin 2026, à l'adresse https://uraer.cder.dz/sienr/sienr2014/gr/Article_Boudia_D06.pdf

130. Moghaddam, H., Oveisi, M., Mehr, M. K., Bazrafshan, J., Naeimi, M. H., Kaleibar, B. P., & Müller-Schärer, H. (2023). Earlier sowing combined with nitrogen fertilization to adapt to climate change effects on yield of winter wheat in arid environments : Results from a field and modeling study. *European Journal of Agronomy*

131. Comité de la sécurité alimentaire mondiale (2012). *Securite alimentaire et changement climatique. Un rapport du Groupe d'Experts de Haut Niveau sur la Sécurité Alimentaire et la Nutrition (HLPE), Juin 2012*.

132. Mourad, F., Abdelali, L., & Zouhair, L. (2017). *Modelling the impact of climate change on cereal yield in Morocco*.

133. Mousavizadeh, S. F., Honar, T., & Ahmadi, S. H. (2016). Assessment of the AquaCrop Model for simulating Canola under different irrigation managements in a semiarid area. *International Journal of Plant Production*, *10*(4), 425-445.

134. Muller, M. (2016). *The impacts of future climate change on land and water productivity of staple crops : A case study for China* [Master's Thesis, University of Twente]. http://essay.utwente.nl/69373/

135. Murshed, M., & Saadat, S. Y. (2018). Effects of urbanization on climate change : Evidence from Bangladesh. *Journal of Natural Sciences Research*, *8*, 1-8. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3247302

136. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. de, Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y., & Kram, T. (2000). *Special report on emissions scenarios*. https://escholarship.org/content/qt9sz5p22f/qt9sz5p22f.pdf

137. Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., Dezetter, A., Guilpart, É., Déme, A., & Ogilvie, A. (2021). Future trend and sensitivity analysis of evapotranspiration in the Senegal River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*.

138. New, M., & Hulme, M. (2000). [No title found]. *Integrated Assessment*, *1*(3), 203-213. https://doi.org/10.1023/A:1019144202120

139. Niu, X., Feng, P., Liu, D., Wang, B., Waters, C., Zhao, N., & Ma, T. (2022). Deficit Irrigation at Pre-Anthesis Can Balance Wheat Yield and Water Use Efficiency under Future Climate Change in North China Plain. *Biology*.

140. Nouaceur, Z., Laignel, B., & Turki, I. (2013). Changements climatiques au Maghreb : Vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral

algérien?*Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, *Volume 7*, 307-323. https://journals.openedition.org/physio-geo/3686

141. O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., and Solecki, W. (2017). The roads ahead : Narratives for shared Socio-economic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, *42*, 169-180. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

142. O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & Van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research : The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, *122*(3), 387-400. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2

143. OMS, P. & UNICEF. (2022). Résumé de L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022. https://www.sidalc.net/search/Record/dig-fao-it-20.500.14283-CC0640FR/Description

144. Organization, W. H. (2015). *Climate and health country profile 2015 : Nigeria*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/208865/WHO_FWC_PHE_EPE_15.11_eng.pdf

145. Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014 : Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc. https://epic.awi.de/id/eprint/37530/

146. Paeth, H., Capo-Chichi, A., & Endlicher, W. (2008). Climate change and food security in tropical West Africa—A dynamic-statistical modelling approach. *erdkunde*, 101-115. https://www.jstor.org/stable/25648102

147. Papy, F. (1979). Analyse du comportement des cultures de ble dur et d'orge dans differentes regions cerealieres du Maroc a travers leur reaction aux variations interannuelles des regimes pluviometriques. *Comptes Rendus des Seances de l'Academie d'Agriculture de France*, *65*. https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/64735f272c1d629bc97db504

148. Patnani, R. N. M., Abdullah, N. M., & Arish, N. A. (2021). Prediction of future temperature using statistical downscaling model (SDSM) in accessing climate change at catchment area Sungai Bekok, Batu Pahat. *Progress in Engineering Application and Technology*, *2*(1), 409-417. https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/968

149. Peltonen-Sainio, P., Juvonen, J., Korhonen, N., Parkkila, P., Sorvali, J., & Gregow, H. (2021). Climate change, precipitation shifts and early summer drought : An irrigation tipping point for Finnish farmers? *Climate Risk Management*, *33*, 100334. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212096321000632

150. Philippon, N., Martiny, N., & Camberlin, P. (2009). Forecasting the photosynthetic activity of vegetation over the Sahel : A model output statistics approach. *International Journal of Climatology*, *29*, 1463-1477. https://hal.science/hal-00172482/

151. Poitou, J., & Braconnot, P. (2020). Climat. *La réalité tout simplement*. https://arceavalduc.fr/wp-content/uploads/2021/02/lesmotsduclimat_ebook.pdf

152. Poussin, J.-C. (1987). Notions de système et de modèle. *Cahiers des Sciences Humaines*, *23*(3-4), 439-441.

153. Pulighe, G., Lupia, F., Chen, H., & Yin, H. (2021). Modeling Climate Change Impacts on Water Balance of a Mediterranean Watershed Using SWAT+. *Hydrology*.

154. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop — The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water : II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438-447. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s

155. Rankine, D. R., Cohen, J. E., Taylor, M. A., Coy, A. D., Simpson, L. A., Stephenson, T., & Lawrence, J. L. (2015). Parameterizing the FAO AquaCrop Model for Rainfed and Irrigated Field-Grown Sweet Potato. *Agronomy Journal*, *107*(1), 375-387. https://doi.org/10.2134/agronj14.0287

156. Roja, M., Navatha, N., Devender Reddy, M., & Deepthi, C. (2020). Estimation of crop water requirement of groundnut crop using FAO CROPWAT 8.0 model. *Agro*

Econ. Int. J, *7*, 35-40. https://www.researchgate.net/profile/T-Neelima/publication/350176344_Yield_Gap_Analysis_of_Rice_Under_Priyadarshini_Jurala_Command_Area_Using_RS_and_GIS/links/60547c49a6fdccbfeaee130c/Yield-Gap-Analysis-of-Rice-Under-Priyadarshini-Jurala-Command-Area-Using-RS-and-GIS.pdf#page=43

157. Rong, X. (2020). *CAMS CAMS-CSM1. 0 model output prepared for CMIP6 HighResMIP highresSST-present*. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6_4123612

158. Rouabhi, A., Hafsi, M., & Monneveux, P. (2019). Climate change and farming systems in the region of Setif (Algeria). *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, *113*(1).

159. Ruane, A. C., Antle, J. M., Porter, C. H., & Rosenzweig, C. (2018). AgMIP climate indicators enable rigorous evaluation of agricultural models. *Agricultural and Forest Meteorology, 250–251*, 164–172. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.036

160. Ruane, A. C., Antle, J. M., Elliott, J., Nelson, G. C., Rosenzweig, C., & Rötter, R. P. (2021). *Climate change impact assessments: An AgMIP perspective*. In Rosenzweig, C. et al. (Eds.), Handbook of Climate Change and Agroecosystems (Vol. 5, pp. 3–26). World Scientific Publishing. https://doi.org/10.1142/12345

161. Sabella, E., Aprile, A., Negro, C., Nicolì, F., Nutricati, E., Vergine, M., Luvisi, A., & Bellis, L. D. (2020). Impact of Climate Change on Durum Wheat Yield. *Agronomy*.

162. Sahnoune, F., Belhamel, M., Zelmat, M., & Kerbachi, R. (2013). Climate change in Algeria : Vulnerability and strategy of mitigation and adaptation. *Energy Procedia*, *36*, 1286-1294.

163. Sahraoui, H., & Adjim, M. (2021). *Meteorological drought hazard analysis of wheat production in the semi-arid basin of Cheliff–Zahrez Nord, Algeria*. **Arabian Journal of Geosciences**, 14(19), Article 2006. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07401-y

164. Salemi, H., Soom, M. A. M., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., & Yusoff, M. K. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, *610*(1), 2204-2215. https://www.researchgate.net/profile/Arman_Ganji/publication/228417114_Application_of_AquaCrop_model_in_deficit_irrigation_management_of_Winter_wheat_in_arid_region/links/55486e860cf26a7bf4dac0ba/Application-of-AquaCrop-model-in-deficit-irrigation-management-of-Winter-wheat-in-arid-region.pdf

165. Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2021). Wheat yield response to climate change varies by development stage. *European Journal of Agronomy, 124*, 126248. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126248

166. Sarangi, & Sekhar, M. (2022). Technologies for Enhancing Water Productivity in Irrigated Agriculture. In C. Ray, S. Muddu, & S. Sharma (Éds.), *Food, Energy, and Water Nexus* (p. 67-95). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85728-8_4

167. Sarkar, J., Chicholikar, J. R., & Rathore, L. S. (2015). Predicting future changes in temperature and precipitation in arid climate of Kutch, Gujarat : Analyses based on LARS-WG model. *Current science*, 2084-2093. https://www.jstor.org/stable/24906708

168. Seferian, R. (2018). *CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 CMIP*. https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6_4342685

169. Shao, L., Zhang, X., Chen, S., Sun, H., & Wang, Z. (2009). Effects of irrigation frequency under limited irrigation on root water uptake, yield and water use efficiency of winter wheat. *Irrigation and Drainage*, *58*(4), 393-405. https://doi.org/10.1002/ird.442

170. Shayanmehr, S., Porhajašová, J., Babošová, M., Sabouni, M. S., Mohammadi, H., Henneberry, S. R., & Foroushani, N. S. (2022). The Impacts of Climate Change on Water Resources and Crop Production in an Arid Region. *Agriculture*.

171. Shoukat, M. R., Cai, D., Shafeeque, M., Habib-ur-Rahman, M., & Yan, H. (2022). Warming Climate and Elevated CO2 Will Enhance Future Winter Wheat Yields in North China Region. *Atmosphere*.

172. Shukla, R., Khare, D., & Deo, R. (2015). Statistical downscaling of climate change scenarios of rainfall and temperature over Indira Sagar canal command area in Madhya Pradesh, India. *2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 313-317. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7424327/

173. Sigmond, M., Anstey, J., Arora, V., Digby, R., Gillett, N., Kharin, V., Merryfield, W., Reader, C., Scinocca, J., & Swart, N. (2023). Improvements in the Canadian Earth system model (CanESM) through systematic model analysis : CanESM5. 0 and CanESM5. 1. *Geoscientific Model Development*, *16*(22), 6553-6591. https://gmd.copernicus.org/articles/16/6553/2023/gmd-16-6553-2023.html

174. Smadhi, D., & Zella, L. (2012). VARIABILITE DE LA PLUVIOMETRIE ETSON IMPACT SUR LA PRODUCTION CEREALIERE AU NORD DE L'ALGERIE. PERIODE (1970-2009). *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 55-63.

175. Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., Semedo, A., Cardoso, R. M., Cabos, W., & Sein, D. V. (2019). Assessing the climate change impact on the North African offshore surface wind and coastal low-level jet using coupled and uncoupled regional climate simulations. Climate Dynamics, 52(11), 7111-7132. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4565-9

176. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & 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. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

177. Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (Vol. 1028). fao Rome, Italy. https://www.researchgate.net/profile/Nageswara-Rao-

178. V/publication/236894273_Suhas_P_Wani_Rossella_Albrizio_V_Nageswara_Rao_2012_Sorghum_In_Crop_Yield_response_to_Water_FAO_Irrigation_and_Drainage_Paper_66_Eds_Pasquale_Steduto_Theodore_C_Hsiao_Elias_Fereres_and_Dirk_RaesPages_/links/0deec51a01ddf96cca000000/Suhas-P-Wani-Rossella-Albrizio-V-Nageswara-Rao-2012-Sorghum-In-Crop-Yield-response-to-Water-

FAO-Irrigation-and-Drainage-Paper-66-Eds-Pasquale-Steduto-Theodore-C-Hsiao-Elias-Fereres-and-Dirk-RaesP.pdf

179. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2014). *Climate Change 2013 : The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change*. https://boris.unibe.ch/71452

180. Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy*, *18*(3-4), 289-307. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102001090

181. Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural water management*, *98*(10), 1615-1621. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377411001193

182. Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Neppel, L., & Ahmad, B. (2011). Modeling snowmelt-runoff under climate scenarios in the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Journal of hydrology*, *409*(1-2), 104-117. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411005816

183. Taïbi, S., Zeroual, A., & Melhani, N. (2021). Evaluation de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques régionaux Cordex-Africa pour la prévision des pluies : Cas du bassin côtier oranais. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, *384*, 213-218. https://piahs.copernicus.org/articles/384/213/2021/

184. Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., & Saito, F. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, *12*(7), 2727-2765. https://gmd.copernicus.org/articles/12/2727/2019/gmd-12-2727-2019.html

185. Teleubay, Z., Yermekov, F., Rustembayev, A., Topayev, S., Zhabayev, A., Tokbergenov, I., Garkushina, V., Igilmanov, A., Shelia, V., & Hoogenboom, G.

(2023). Comparison of Climate Change Effects on Wheat Production under Different Representative Concentration Pathway Scenarios in North Kazakhstan. *Sustainability*.

186. Testa, G., Gresta, F., & Cosentino, S. L. (2011). Dry matter and qualitative characteristics of alfalfa as affected by harvest times and soil water content. *European journal of agronomy*, *34*(3), 144-152.

187. Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies : Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, *456*, 12-29. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412004556

188. Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco) : Application to irrigation management. *gricultural Water Management*, *163*, 219-235. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377415300998

189. Trépos, R., Lemarié, S., Raynal, H., Morison, M., Couture, S., & Garcia, F. (2014). Apprentissage par renforcement pour l'optimisation de la conduite de culture du colza. *14e Journées Francophones Planification, Décision, Apprentissage pour la conduite de systeme-JFPDA*, 1-13. https://hal.science/hal-01173333/

190. Trombetta, A., Iacobellis, V., Tarantino, E., & Gentile, F. (2016). Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. *Agricultural Water Management*, *164*, 304-316. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837741530130X

191. Tufa, Z., Getnet, M., & Nigatu, L. (2018). Modeling Impacts of Climate Change on Bread Wheat (Triticum Aestivum l.) Productivity in Bale Highlands, South Eastern Ethiopia : Case of Robe Area. *Asian Journal of Applied Science and Engineering*.

192. van der Linden, P., & Mitchell, editors. (2009). ENSEMBLES : Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. *Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK*, *160*.

193. Van Keulen, H., Breman, H., Van der Lek, J. J., Menke, J. W., Stroosnijder, L., & Uithol, P. W. J. (1986). Prediction of actual primary production under nitrogen limitation. *Modelling of Extensive Livestock Production Systems. Proc. ILCA-ARO-CABO Workshop, Bet Dagan, ILCA, Addis Ababa*, 42-79. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=H655Q9QLBE8C&oi=fnd&pg=PA42&dq=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%E2%80%93Plant+Systems.+Pudoc+Wageningen,+The+Netherlands,+pp.+192%E2%80%93220+(1981).&ots=e3pQnocziX&sig=0LAYhyIufyY7n19tFXKb71l5OVc

194. Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European journal of agronomy*, *18*(3-4), 201-234. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102001065

195. Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Vila, M. G., & Moreno, P. M. (2014). AquaCrop : FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, *62*, 351-360. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521400228X

196. Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.-E., Guerif, M., Soudais, J., & Justes, E. (2011). A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling & Software*, *26*(4), 386-394. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815210002574

197. Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2018). *Working with dynamic crop models : Methods, tools and examples for agriculture and environment*. Academic Press.

198. Weir, A. H., Bragg, P. L., Porter, J. R., & Rayner, J. H. (1984). A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *The Journal of Agricultural Science*, *102*(2), 371-382. https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/winter-wheat-crop-simulation-model-without-water-or-nutrient-limitations/80C9DA188913CA1E2822FB015215B3E0

199. Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, *27*(1), 129-0144. https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32748

200. Willmott, C. J. (1984). On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. In G. L. Gaile & C. J. Willmott (Éds.), *Spatial Statistics and Models* (p. 443-460). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23

Xiao, G., Zhang, Q., Yao, Y., Zhao, H., Wang, R., Bai, H., & Zhang, F. (2008). Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China. *Agriculture, ecosystems & environment*, *127*(1-2), 37-42. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880908000613

201. Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., & Hosaka, M. (2019). *MRI MRI-ESM2. 0 model output prepared for CMIP6 CMIP*. https://www.wdc climate.de/ui/entry?acronym=C6_5243961

202. Zeleke, K. T., Luckett, D., & Cowley, R. (2011). Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal*, *103*(6), 1610-1618. https://doi.org/10.2134/agronj2011.0150

203. Zeleke, K. (2021). Simulating Agronomic Adaptation Strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on Wheat Yield in South-Eastern Australia. *Agronomy*.

204. Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2019). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Climate Dynamics*, *52*(1-2), 227-243. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0

ملخص

أجريت هذه الدراسة في المنطقة شبه الجافة لولاية " سطيف "خلال المواسم الزراعية الثلاثة 2021-2022، 2022-2023 و 2023-2024 من أجل الحفاظ و البحث عن طرق تأقلم إنتاج القمح الصلب واللين في ظل التحديات التي يطرحها تغير المناخ. أظهرت التوقعات المناخية للفترتين المستقبلية القريبة (2030) والمتوسطة (2050) تحت تأثير سيناريوهاتSSPs ، ارتفاع متوسط درجة الحرارة ليصل إلى 17.89° سنة 2030 و18.63° سنة 2050، بينما سينخفض معدل تساقط الأمطار السنوي من 288.824 ملم و270.758 ملم حتى 260.244 ملم للفترتين على التوالي. تمت محاكاة مختلف المؤشرات الإنتاجية باستخدام نموذج Aquacrop في أصناف القمح الصلب "الواد البارد" والقمح اللين "الوفاق"، وأظهرت دقة النموذج من خلال مؤشرات إحصائية بالنسبة لمردود القمح الصلبd=0.92 ، rmse = 0.34، r = 0.99، nrmse=22.1 ، والقمح اللينd=0.83 ، rmse=0.61، nrmse=34.7، r = 0.94 .وعند مقارنة نتائج متوسط إنتاج القمح للفترة المرجعية (1995-2014)، المقدرة بـ 6ق/هـ للقمح الصلب 7.4 ق/هـ للقمح اللين، وجد أن المحاكاة المستقبلية تشير إلى زيادات مهمة في جميع السيناريوهات. حيث بلغت مردودية القمح الصلب للفترة (2020-2039) ما بين 14.20 إلى 16.60 ق/هـ، وللفترة (2040-2059) ما بين 15.20 إلى 28.75 ق/هـ بحسب مستوى السيناريو المناخي، أما القمح اللين فقد تراوحت المردودية ما بين 9.5 إلى 14 ق/هـ للفترة الأولى، ومن 10.5 إلى 15.5 ق/هـ للفترة الثانية. من حيث الكتلة الحيوية، بالنسبة للقمح الصلب، بلغت القيم المرجعية 13.17 ق/هـ بينما ارتفعت قيم المحاكاة بين 31.52 إلى 36.83 ق/هـ للفترة الأولى، وبين 33.73 إلى 39.38 للفترة الثانية. وفي القمح اللين ارتفع المردود المرجعي من 14 ق/هـ إلى 18–28ق/هـ و20–29.86 ق/هـ في الفترتين على التوالي.وبخصوص إنتاجية المياه، ارتفعت القيم المرجعية من 0.15 كغ/م^3 لتصل إلى ما بين 0.39 و0.46 كغ/م^3 في القمح الصلب 0.16 و0.18 كغ/م^3 في القمح اللين للفترة (2020-2039)، أما للفترة (2040-2059) بلغت الإنتاجية 0.41–0.84 كغ/م^3 للقمح الصلب و0.22–0.53 كغ/م^3 للقمح اللين.في التحليل النهائي، فسرت الدراسة هذه النتائج بتحسن محصول القمح الصلب واللين وارتفاع إنتاجية المياه والكتلة الحيوية، وذلك لزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الجو الذي يحفّز عملية التركيب الضوئي، مع توقع مجموعة آثار أخرى مثل تقليص مدة النمو بفعل ارتفاع درجات الحرارة ودعم الزرع المبكر إثر انخفاض الأمطار، ما يجعل هذه الإجراءات استراتيجية فعالة لاستدامة الإنتاج الزراعي أمام تغير المناخ.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، القمح اللين، منطقة شبه جافة، سيناريوهات SSP_s، تغير المناخ.

Abstract

This study was conducted in a semi-arid region of Setif province over three consecutive cropping seasons (2021-2024) to investigate adaptation strategies for the production of durum and soft wheat under the challenges of climate change. Climate forecasts for the short-term (2030) and medium-term (2050), across all SSP scenarios, predict an increase in average temperature (reaching 17.89°C and 18.63°C in 2030 and 2050 respectively) and a decrease in annual rainfall amounts (down to 288.824 mm, 270.758 mm, and 260.244 mm for the corresponding periods). The Aquacrop model was employed to simulate yield, biomass, soil moisture, and vegetation cover for two wheat species durum wheat (Oued el Bared) and soft wheat (El Wifaq) under three SSP scenarios for the future horizons (2020-2039) and (2040-2059). Model accuracy was evaluated using statistical indicators (NRMSE, RMSE, D ,r), with values for durum wheat yield as follows: d=0.92, rmse=0.34, nrmse=22.1;r=0.99, and for soft wheat: d=0.83, rmse=0.61, nrmse=34.7,r=0.94 confirming strong reliability of the simulations. Compared to the reference period (1995-2014) where average yields were 6 q/ha for durum wheat and 7.4 q/ha for soft wheat, future projections show marked increases: durum wheat yields range from 14.20 to 16.60 q/ha (2020-2039) and 15.20 to 28.75 q/ha (2040-2059); soft wheat yields range from 9.5 to 14 q/ha (2020-2039) and 10.5 to 15.5 q/ha (2040-2059), depending on the scenario. Durum wheat dry biomass increases from 13.17 q/ha (reference) to 31.52–36.83 q/ha (2020-2039) and 33.73–39.38 q/ha (2040-2059); soft wheat dry biomass rises from 14 q/ha to 18–28 q/ha and 20–28.86 q/ha for the same periods. Water productivity also improves from 0.15 kg/m³ (reference) to 0.39–0.46 kg/m³ for durum wheat and 0.16–0.18 kg/m³ for soft wheat over 2020-2039; and for 2040-2059, it reaches 0.41–0.84 kg/m³ (durum) and 0.22–0.53 kg/m³ (soft). These findings indicate that increased atmospheric CO_2 enhances photosynthesis, reduced evaporation and early sowing supported by decreased precipitation favor yield and water use efficiency, although growing periods are shortened by rising temperatures. Thus, these strategies offer promising avenues for sustaining agricultural production in semi-arid regions under climate change.

Key-words: Durum wheat, Soft wheat, Semi-arid zone, SSP scenarios, Climate change.

Résumé

Cette étude a été réalisée dans une région semi-aride de la wilaya de Sétif durant trois saisons agricoles consécutives (2021-2024), dans le but d'explorer des stratégies d'adaptation pour la production de blé dur et de blé tendre face aux défis du changement climatique. Les projections climatiques à court terme (2030) et à moyen terme (2050), selon tous les scénarios SSP, indiquent une augmentation de la température moyenne (atteignant 17,89°C puis 18,63°C en 2030 et 2050 respectivement) et une baisse des précipitations annuelles (de 288,824 mm en 1995-2014 à 270,758 mm et 260,244 mm respectivement). Le modèle Aquacrop a été utilisé afin de simuler le rendement, la biomasse, l'humidité du sol et la couverture végétale pour deux espèces : le blé dur « Oued el Bared » et le blé tendre « El Wifaq », sous l'effet des trois scénarios SSP pour les horizons 2020-2039 et 2040-2059. La performance du modèle a été évaluée à l'aide des indices statistiques (NRMSE, RMSE, D ,R), révélant pour le blé dur d=0,92, rmse=0,34, nrmse=22,1, r=0.99 et pour le blé tendre d=0,83, rmse=0,61, nrmse=34,7, r=0.94 ce qui témoigne d'une bonne fidélité des simulations. Par rapport à la période de référence (1995-2014), où les rendements étaient de 6 q/ha pour le blé dur et 7.4 q/ha pour le blé tendre, les projections futures présagent des augmentations notables : pour le blé dur, 14,20 à 16,60 q/ha (2020-2039) et 15,20 à 28,75 q/ha (2040-2059) ; pour le blé tendre, 9.5 à 14 q/ha (2020-2039) et 10.5 à 15.5 q/ha (2040-2059). La biomasse séche du blé dur passe de 13,17 q/ha (référence) à 31,52–36,83 q/ha (2020-2039) puis 33,73–39,38 q/ha (2040-2059), tandis que celle du blé tendre s'accroît de 14 q/ha à 18–28 q/ha puis 20–29,86 q/ha selon les périodes. La productivité de l'eau s'améliore également de 0,15 kg/m³ (référence) à 0,39–0,46 kg/m³ pour le blé dur et 0,16–0,18 kg/m³ pour le blé tendre sur 2020-2039 ; sur 2040-2059, elle atteint 0,41–0,84 kg/m³ (blé dur) et 0,22–0,53 kg/m³ (blé tendre). Ces résultats démontrent que l'élévation du CO_2 atmosphérique stimule la photosynthèse, tandis que la réduction de l'évaporation et le semis précoce, permis par la diminution des précipitations, favorisent le rendement et l'efficience de l'utilisation de l'eau, bien que la période de croissance soit écourtée par la hausse des températures. Ces stratégies émergent ainsi comme des pistes prometteuses pour assurer la durabilité de la production agricole en régions semi-arides, même sous l'effet du changement climatiques.

Mots clés : Blé dur, Blé tendre, Zone semi-aride, Scénarios SSPs, Changement climatique.