



Université de Biskra – Mohamed Kheider
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

THÈSE DE DOCTORAT

Filière : Sciences Agronomiques
Spécialité : Hydraulique Agricole

Ref. : _____/2025

Presente par:
Sakher Mokhtari

Effet du changement climatique sur les besoins en eau
des cultures et leurs zones d'adaptations

Soutenue publiquement, le 02/12/2025

devant le jury compose de

M. MEHAOUA Mohamed Seghir	Pr. Université de Biskra	President
M. Ayoub Hadjeb	Pr. Université de Biskra	Directeur
M. Ahmed Nourani	Dr. CRSTRA Biskra	Co-Directeur
M. BEN SALAH Mohamed Kamel	Dr. CRSTRA Biskra	Rapporteur
M. NIA Billal	Dr. CRSTRA Biskra	Rapporteur

Année Universitaire 2025/2026

DÉDICACE

À la mémoire de mon très cher père Bachir,

À ma mère bien-aimée Oum El-Khir,

Pour vos sacrifices silencieux et votre amour inconditionnel, véritables phares qui ont éclairé chacun de mes pas.

À mon épouse, je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour ses efforts inlassables et ses sacrifices, sans lesquels l'aboutissement de ce travail n'aurait pas été possible.

À mes enfants, que j'aime de tout mon cœur, je vous demande pardon pour le temps que je n'ai pas su vous consacrer durant cette période exigeante.

À mes frères et sœurs, merci pour votre soutien, vos prières et votre affection constante, qui m'ont porté tout au long de ce chemin.

À toutes les personnes qui ont croisé ma route et, de près ou de loin, contribué à ce parcours,

... je dédie ce modeste travail.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a permis d'atteindre cette étape décisive de mon parcours académique.

J'adresse ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Professeur Ayoub Hadjeb, enseignant au Département des Sciences Agronomiques de l'Université de Biskra, pour son encadrement précieux, son soutien indéfectible et la générosité avec laquelle il a partagé son savoir. Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et la clarté de ses orientations ont grandement enrichi cette recherche et ont guidé chacune des étapes de ce travail. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour son engagement constant et sa confiance tout au long de ce parcours.

Je remercie également mon co-encadreur, Dr Ahmed Nourani, Directeur de recherche au Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) de Biskra, pour sa précieuse collaboration, ses orientations éclairées et la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Sa disponibilité, son écoute bienveillante et ses conseils méthodologiques ont grandement contribué à la rigueur scientifique de cette recherche. Je lui suis profondément reconnaissant pour son implication constante et son engagement à mes côtés.,

Je remercie, Monsieur MEHAOUA Mohamed Seghir Professeur à l'Université de Mohamed Kheider de Biskra, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Un remerciement particulier aux BEN SALAH Mohamed Kamel et NIA Billal du Centre de recherche scientifique et technique sur les régions aride de Biskra, pour avoir accepté d'évaluer cette thèse et d'enrichir ce travail par leurs perspectives scientifiques.

J'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à monsieur Amine M. Benmehaia, Docteur à l'Université de Mohamed Kheider de Biskra. Vous avez su me guider inlassablement, Vos conseils et remarques pertinents m'ont toujours poussé à faire mieux. Je vous renouvelle mes sincères remerciements.

À l'ensemble des chercheurs de la station d'observation CRSTRA, M'sila, merci d'avoir su créer un environnement académique stimulant et propice à la recherche.

Enfin, à tous ceux qui ont tracé mon chemin : Ma famille, mes enseignants, mes amis et camarades de promotion, et tous les enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à aujourd'hui.

Résumé

Comprendre les besoins en eau du blé dur est essentiel pour une gestion efficace de l'eau dans les zones méditerranéennes hautement sensibles, notamment dans un contexte de changement climatique. Cette étude examine les implications du changement climatique sur les besoins en eau des cultures de blé dans le nord de l'Algérie selon quatre scénarios socio-économiques partagés (SSP) distincts : SSP126, SSP245, SSP370 et SSP585. En utilisant des projections climatiques désagrégées du modèle CMCC-ESM2, l'étude s'appuie sur le logiciel CROPWAT 8.0 pour prévoir et évaluer les changements dans l'évapotranspiration de référence (ET₀) et les besoins en eau des cultures (CWR) pour le blé au cours des prochaines décennies, en prenant comme période de référence 1970–2000 et comme périodes futures 2021–2100.

Des augmentations significatives des températures annuelles maximales et minimales, ainsi que des régimes pluviométriques variables, sont attendues dans tous les scénarios SSP. Plus précisément, l'ET₀ annuelle moyenne devrait augmenter de 7,7 %, 10,6 %, 12,8 % et 17,2 % respectivement pour les scénarios SSP126, SSP245, SSP370 et SSP585. Les besoins en eau des cultures (CWR) devraient quant à eux croître de 8,1 %, 10,4 %, 13 % et 18 % d'ici la fin du siècle pour ces mêmes scénarios. Les niveaux de stress hydrique varieront considérablement, soulignant la nécessité de stratégies d'adaptation, notamment des technologies d'irrigation avancées, des pratiques de gestion de l'eau adaptées aux régions et des recherches élargies sur différentes cultures pour faire face efficacement aux défis posés par le changement climatique sur la production de blé.

Mots-clés Changement climatique · Besoins en eau · Blé · CROPWAT · SSP · Algérie

Abstract

Understanding water needs for durum wheat is essential for effective water management in highly sensitive Mediterranean zones, especially under climate change. This study investigates the implications of climate change on the water requirements of wheat crops in Northern Algeria under four distinct Shared Socioeconomic Pathways (SSP): SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585. Employing downscaled climate projections from the CMCC-ESM2 model, the study uses CROPWAT 8.0 software to forecast and assess changes in the reference evapotranspiration (ET₀) and crop water requirements (CWR) for wheat over future decades, regarding 1970–2000 as the base time span, and from 2021 to 2100 as the future time periods. Significant increases in annual maximum and minimum temperatures and variable future rainfall patterns will occur under all SSP scenarios. Specifically, mean annual ET₀ is projected to rise by 7.7%, 10.6%, 12.8%, and 17.2% under SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585, respectively. The CWR is expected to increase by 8.1%, 10.4%, 13%, and 18% by the end of the century for the respective scenarios. Levels of water stress will differ widely highlighting the need for adaptive strategies, including advanced irrigation technologies, region-specific water management practices, and expanded research into various crops to effectively address the challenges posed by climate change on wheat production.

Keywords Climate change · Water requirements · Wheat · CROPWAT · SSP · Algeria

ملخص

فهم الاحتياجات المائية للقمح القاسي ضروري للإدارة الفعالة للمياه في المناطق المتوسطة شديدة الحساسية، خاصة في ظل تغير المناخ. تبحث هذه الدراسة في تأثيرات تغير المناخ على الاحتياجات المائية لمحاصيل القمح في شمال الجزائر وفق أربعة سيناريوهات اجتماعية اقتصادية مشتركة SSP126: SSP) و SSP245 و SSP370 و SSP585 باستخدام توقعات مناخية مصغرة من نموذج CMCC-ESM2 ، تعتمد الدراسة على برنامج CROPWAT 8.0 للتنبؤ وتقييم التغيرات في البخر-نتح المرجعي (ET0) والاحتياجات المائية للمحاصيل (CWR) للقمح خلال العقود القادمة، مع اعتماد الفترة 1970–2000 كفترة أساس، والفترة 2021–2100 كفترات مستقبلية.

من المتوقع حدوث زيادات كبيرة في درجات الحرارة القصوى والدنيا السنوية وأنماط متغيرة لهطول الأمطار في المستقبل في جميع سيناريوهات SSP. على وجه التحديد، من المتوقع أن يرتفع متوسط ET0 السنوي بنسبة 7.7% و 10.6% و 12.8% و 17.2% في ظل سيناريوهات SSP126 و SSP245 و SSP370 و SSP585 على التوالي. كما من المتوقع أن تزيد الاحتياجات المائية للمحاصيل (CWR) بنسبة 8.1% و 10.4% و 13% و 18% بحلول نهاية القرن لهذه السيناريوهات على التوالي. ستختلف مستويات الإجهاد المائي بشكل كبير، مما يبرز الحاجة إلى استراتيجيات التكيف، بما في ذلك تقنيات الري المتقدمة، وممارسات إدارة المياه المخصصة للمناطق، وتوسيع الأبحاث حول محاصيل مختلفة لمواجهة التحديات التي يفرضها تغير المناخ على إنتاج القمح بشكل فعال.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ · الاحتياجات المائية · القمح · SSP · CROPWAT · الجزائر

TABLE DE MATIÈRES

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Contexte global du changement climatique et de l'agriculture	6
1. Introduction	6
2. Tendances démographiques mondiales et pression sur la production agricole	7
2.1. Évolution de la population mondiale et de la production agricole	7
2.2. Défis pour nourrir la population future.....	8
3. Le changement climatique : perspectives et définitions	9
3.1. Définitions fondamentales.....	9
3.2. Variabilité temporelle : distinction fondamentale entre météo et climat	9
3.3. Changement climatique et variabilité naturelle	10
Chapitre 2 : Réchauffement climatique : causes, projections et conséquences agricoles.....	12
1. Origines du changement climatique contemporain	12
2. Les causes du réchauffement climatique : entre controverses et consensus scientifique	12
3. Tendances climatiques et leurs répercussions sur l'agriculture.....	14
3.1. Contexte global.....	14
3.2. Projections des changements thermiques et leurs conséquences agricoles	14
3.3. Vulnérabilité des cultures stratégiques	14
3.4. Projection des changements de température et de leur impact sur la production agricole	15
3.5. Projection des changements des précipitations et impacts sur les cultures	16
3.6. Évolution projetée du CO ₂ et impacts sur les cultures	17
3.7. Effets du CO ₂ sur la photosynthèse et le rendement des cultures.....	18
4. Événements climatiques extrêmes et leurs impacts sur l'agriculture.....	19
4.1. Sécheresse	20
4.2. Inondations	21
4.3. Cyclones	22
4.4. Vagues de chaleur et incendies	22

Chapitre 3 : Les scénarios climatiques futurs.....	25
1. Introduction	25
1.1. Les scénarios SA90 et IS92.....	25
1.2. Les scénarios SRES.....	26
1.3. Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway)	28
1.4. Les scénarios SSP.....	30
2. Les projections climatiques futures selon les scénarios	34
2.1. Température.....	35
2.2. Précipitations	39
3. Tendances Observées et Projetées du Réchauffement Climatique en Algérie.....	40
3.1 Températures	40
3.2. Précipitation : tendances observées et projections	41
3.3. Impacts possibles sur Algérie	43
4. Limites et incertitudes des projections climatiques.....	44
4.1. Sources principales d'incertitude	44
4.2. Méthodes pour traiter les incertitudes	50
4.3. Conséquences des incertitudes sur les décisions d'adaptation	51
Chapitre 4 : Évolution du climat et impacts sur la ressource en eau	53
1. Introduction	53
2. Tendances climatiques globales.....	53
3. Impacts sur la disponibilité des ressources en eau	54
4. Enjeux hydriques en Afrique du Nord.....	54
4.1. Spécificités de la région nord-africaine.....	55
4.2. Situation et défis spécifiques de l'Algérie.....	55
Chapitre 5 : Les céréales en contexte de changement climatique	57
1. Introduction	57
2. Cycle biologique et sensibilité climatique du blé.....	58
2.1. Les stades phénologiques	59
3. Répartition des zones de production céréalière.....	63
4. Effets du changement climatique sur les stades phénologiques du blé	64
4.1. Avancement du cycle phénologique et réduction de sa durée	65
4.2. Phase végétative considérablement écourtée.....	65
4.3. Phase reproductive : stabilité ou allongement selon la stratégie de semis	66
4.4. Impacts agronomiques majeurs	66

Chapitre 6 : Matériel et Méthodes	68
1. Introduction	68
2. La Zone d'étude.....	70
2.1. Caractéristiques de la Zone d'Étude	70
2.2. Contexte Agroclimatique et Spécificités du Milieu.....	71
2.3. Caractéristiques Climatiques et Variabilité Spatio-Temporelle	72
2.4. Potentiel Agricole et Contraintes de Production.....	72
3. Procédure de Projection des Données et du Climat.....	74
4. Mise en Œuvre du Modèle de Culture.....	76
5. Description du modèle CROPWAT	78
6. Description du modèle climatique CMCC-ESM2.....	79
7. Détermination des Besoins en Eau des Cultures (CWR)	80
Chapitre 7 : Résultats et Discussions.....	85
1. Introduction	85
2. Changements futurs de température et de précipitations.....	85
2.1. Période de référence (1970-2000)	85
2.2. Température minimale : Projections par scénario (2021-2100).....	86
2.3. Température maximale : Projections par scénario (2021-2100).....	88
2.4. Changements projetés de la précipitation.....	90
2.5. Comparaison intégrée des scénarios SSP	94
2.6. Discussion générale sur l'évolution future des précipitations et températures.....	96
3. Évapotranspiration de référence : analyses actuelles et perspectives futures.....	99
3.1. Analyse de la période de base (1970–2000) de l'évapotranspiration de référence (ET ₀)	99
3.2. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP1-2.6	100
3.3. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP2-4.5	102
3.4. Projections futures de l'évapotranspiration de référence selon le scénario SSP3-7.0	105
3.5. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP5-8.5	107
3.6. Discussion et analyse comparative des scénarios de projection de l'ET ₀	110
4. Besoins en eau des cultures : diagnostic actuel et projections future	111
4.1. Analyse actuelle des besoins en eau des cultures	112
4.2. Évaluation des impacts des scénarios climatiques sur les besoins en eau futurs.....	112
5. Discussion générale des résultats des besoins en eau des cultures (CWR)	115
Conclusion générale	119
Références bibliographiques	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Impact d'une augmentation de 1°C sur les moyennes de rendements :	15
Tableau 2. caractéristiques des scénarios RCP	29
Tableau 3. Anomalies de la température annuelle moyenne de l'air en surface (°C) selon le CMIP6. Sont affichées les moyennes multi-modèles ainsi que, entre parenthèses, les intervalles de 5 à 95 %, pour certaines périodes, régions et SSP sélectionnés.	38
Tableau 4. Évolution projetée des précipitations annuelles et des risques climatiques par région en Algérie	43
Tableau 5. Hausse projetée de la Tmin annuelle moyenne (°C) par rapport à 1970-2000	86
Tableau 6. Évolution de la Tmax moyenne annuelle (°C) par rapport à 1970-2000	88
Tableau 7. Résultats des projections des changements des précipitations mensuelles pour la zone d'étude.....	98
Tableau 8. Comparaison des moyennes saisonnières de l'ET ₀ à l'horizon 2100.....	111

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Tendances de la population mondiale et de la production céréalière sur la période 1961-2018.	8
Figure 2. Changement climatique et variabilité météorologique à court terme.	13
Figure 3. Anomalies de température des terres et des océans à l'échelle mondiale par rapport à la période de référence de 1901 à 2000	13
Figure 4. Trend of Atmospheric CO2 emissions under different emission scenarios.	18
Figure 5. les émissions mondiales de CO ₂ selon les six scénarios illustratifs du SRES (A1FI, A1B, A1T, A2, B1, B2, IS92a), jusqu'en 2100.	28
Figure 6. Architecture matricielle croisant les trajectoires socio-économiques (SSP) et les profils de concentration représentatifs (RCP).	31
Figure 7. Représentation schématisée des différentes sources d'incertitude dans les prévisions climatiques et les analyses d'impact (Noto et al., 2023)	47
Figure 8. Les stades phénologiques du blé	63
Figure 9. Les zones potentielles de production de culture pluviale blé dans le Nord de l'Algérie (Source : Cadi et al., 2000).	64
Figure 10. Méthodologie d'évaluation des besoins en eau des cultures.	70
Figure 11. Localisation de la zone d'étude	71
Figure 12. Projection de la température minimale durant la période 2021-2100 selon les scénarios	87
Figure 13. Projection de la température maximale durant la période 2021-2100 selon les scénarios	90
Figure 14. Les variations saisonnières des précipitations de la période 2081-2100, pour les quatre scénarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5).	96
Figure 15. l'évapotranspiration de référence de la période de base (1970–2000).	100
Figure 16. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP1-2.6.	102
Figure 17. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP2-4.5.	104
Figure 18. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP3-7.0.	107
Figure 19. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP5-8.5.	109
Figure 20. Projection des besoins en eau des cultures sous les différents scénarios climatiques pour les quatre périodes 2021-240, 2041-260, 2061-280 et 2081-2100	114

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Le changement climatique représente l'un des défis les plus urgents de notre époque, avec des répercussions profondes sur l'agriculture mondiale. Les perturbations climatiques, telles que la hausse des températures et l'irrégularité croissante des précipitations, bouleversent les cycles culturels et accentuent la pression sur les ressources en eau. Cette situation est particulièrement critique dans les régions arides et semi-arides comme l'Afrique du Nord, où l'Algérie doit déjà faire face à une pénurie hydrique grandissante, menaçant directement sa sécurité alimentaire et les moyens de subsistance de ses agriculteurs (Mokhtari S. et al. 2025).

Les projections scientifiques dressent un tableau alarmant pour les décennies à venir. Selon le GIEC (2021), la température moyenne mondiale a augmenté de 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle, avec une accélération notable depuis les années 1980. Cette tendance s'accompagne d'une intensification des phénomènes extrêmes : sécheresses prolongées, vagues de chaleur plus fréquentes et précipitations erratiques. Ces changements perturbent la croissance des cultures, modifient leur cycle phénologique et augmentent leurs besoins en eau, alors même que les réserves disponibles diminuent (Chourghal N. et al 2023).

La raréfaction de l'eau constitue l'une des conséquences les plus graves du réchauffement climatique. Les nappes phréatiques s'épuisent sous l'effet combiné de la baisse des précipitations et de la surexploitation, tandis que l'évapotranspiration accrue assèche les sols. En Algérie, certaines régions ont déjà perdu près de 40 % de leurs ressources en eau au cours des vingt dernières années. Cette crise hydrique frappe de plein fouet les petits exploitants agricoles, qui voient leurs récoltes diminuer et leurs revenus s'effriter, aggravant ainsi les inégalités socio-économiques (Bouchentouf, S., & Benabdeli, K., 2021).

Face à ces défis, l'adaptation devient une nécessité vitale. Des solutions émergent, comme l'adoption de cultures résistantes à la sécheresse, l'optimisation des systèmes d'irrigation ou la gestion durable des nappes phréatiques. Mais pour être efficaces, ces mesures doivent

s'accompagner d'une volonté politique forte et d'une coopération internationale. Car au-delà des données et des modèles climatiques, c'est bien l'avenir des populations rurales et la stabilité alimentaire de régions entières qui sont en jeu.

Le Nord Afrique particulièrement vulnérable aux impacts du changement climatique, affiche une situation hydrique alarmante qui menace directement son secteur agricole. La région cumule en effet plusieurs facteurs de risque : une pluviométrie déjà faible (100-600 mm/an selon les zones) et en nette diminution (-20 à 30% depuis 1970), une variabilité interannuelle marquée des précipitations, et des écosystèmes majoritairement arides à semi-arides particulièrement sensibles aux perturbations climatiques. Ces défis s'aggravent avec le réchauffement accéléré de la région (+1,5°C depuis 1970, dépassant la moyenne mondiale selon l'ONU), transformant radicalement le paysage agricole (IPCC, 2021). La conjugaison de ces facteurs entraîne une baisse dramatique des ressources hydriques disponibles tandis que les besoins en irrigation connaissent une croissance exponentielle, créant une tension sans précédent sur les systèmes de production alimentaire.

La situation s'aggrave rapidement. Selon le réseau MedECC (2020), la région méditerranéenne s'est réchauffée de 1,5°C - dépassant déjà la moyenne mondiale. Les projections les plus pessimistes (scénario RCP 8.5) anticipent une hausse thermique pouvant atteindre +4°C d'ici 2100, accompagnée d'une réduction de 10 à 30% des précipitations dans certaines zones du Maghreb.

Ces bouleversements climatiques frappent de plein fouet les ressources hydriques stratégiques : les barrages voient leurs réserves diminuer, les oueds connaissent des régimes hydrologiques de plus en plus erratiques, et les nappes phréatiques subissent une pression croissante. Paradoxalement, la demande en eau ne cesse d'augmenter, tirée par la croissance démographique, l'urbanisation accélérée et l'évolution des pratiques agricoles. Ce déséquilibre croissant entre offre et demande hydriques place la région nord-africaine devant un défi existentiel pour sa sécurité hydrique et alimentaire.

L'Algérie subit déjà de plein fouet les conséquences du changement climatique sur ses ressources. L'Algérie, où l'agriculture emploie 25% de la population active et contribue à 12% du PIB, fait face à une crise hydrique sans précédent. Le pays dispose de moins de 300 m³ d'eau/habitant/an, bien en dessous du seuil de pénurie (500 m³) défini par l'OMS (Bessaoud, O., 2019). Cette pénurie s'aggrave sous l'effet de trois facteurs : une répartition inégale des ressources (concentrées au Nord), des infrastructures d'irrigation vétustes (plus de pertes) et une surexploitation des nappes phréatiques entraînent une baisse annuelle.

Les agriculteurs algériens, particulièrement les petits exploitants (70% des fermes), subissent de plein fouet cette crise. Leurs rendements chutent dangereusement tandis que les coûts d'irrigation s'envolent. Les données météorologiques révèlent une baisse d'environ 20% des précipitations depuis 1970, avec une accentuation dans l'Ouest et les Hauts Plateaux. Cette raréfaction s'accompagne d'un abaissement alarmant des nappes phréatiques, notamment dans la Mitidja et le Sahara septentrional (Kourat, T. 2021 ; ONM, 2021).

Le secteur agricole, qui consomme 64% des ressources nationales, présente une situation paradoxale. Alors que le pays est en stress hydrique ($<500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$), les systèmes d'irrigation inefficaces gaspillent plus de 40% de l'eau (FAO, AQUASTAT, 2020). Cette mauvaise gestion intervient alors que les besoins en irrigation devraient augmenter de 15 à 25% d'ici 2050, particulièrement pour les cultures vitales (céréales, agrumes) (Bouazzara et al., 2018 ; Cherif et al., 2021).

Face à cette situation critique, l'Algérie doit impérativement moderniser ses infrastructures hydrauliques et adopter des pratiques agricoles résilientes. Sans mesures urgentes, c'est non seulement la sécurité alimentaire mais aussi la stabilité socio-économique du pays qui pourrait être compromises dans les prochaines décennies.

Face à ces enjeux, il est nécessaire de comprendre comment le changement climatique influence les besoins en eau des cultures agricoles, en particulier dans des contextes arides comme celui de l'Algérie. Cette synthèse bibliographique vise à :

- Analyser les impacts du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et les besoins hydriques des cultures.
- Identifier les méthodes d'évaluation des besoins en eau des cultures dans un contexte de variabilité climatique.
- Examiner les stratégies d'adaptation mises en œuvre pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture.
- Proposer des recommandations pour une gestion durable de l'eau agricole face aux défis climatiques.

Cette analyse s'appuiera sur une revue de la littérature scientifique récente, incluant des études de cas pertinentes pour la région d'étude. Elle contribuera à une meilleure compréhension des interactions entre le changement climatique, la gestion de l'eau et la production agricole,

fournissant ainsi des éléments pour orienter les politiques et les pratiques agricoles vers une plus grande résilience face aux changements climatiques.

SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Contexte global du changement climatique et de l'agriculture

1. Introduction

Le changement climatique est une réalité, et comprendre les liens entre ce phénomène et la production agroalimentaire est essentiel pour développer notre capacité à assurer un approvisionnement alimentaire suffisant à une population mondiale en croissance. Selon les projections, la population mondiale dépassera 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050, ce qui signifie qu'il faudra nourrir environ 1,9 milliard de personnes supplémentaires par rapport à 2020 (Nations Unies, 2019). Cependant, les terres agricoles disponibles continueront de diminuer, nombre d'entre elles étant converties en zones urbaines dans le cadre de l'urbanisation croissante. Nourrir plus de personnes avec moins de terres disponibles est un défi colossal. À cela s'ajoute l'expansion rapide de la classe moyenne mondiale, entraînant une demande accrue en viande, produits laitiers et aliments plus nutritifs.

Malheureusement, les effets du changement climatique, températures plus élevées, sécheresses, événements extrêmes plus fréquents, élévation du niveau de la mer et augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, rendent cette tâche encore plus difficile en réduisant à la fois la quantité et la qualité des ressources alimentaires. Le changement climatique a déjà affecté la production alimentaire mondiale, avec une baisse de la productivité et des rendements projetés des principales cultures vivrières dans toutes les régions du monde (Arora, 2019 ; Ray et al., 2019). Ses effets néfastes impactent tous les composants des systèmes alimentaires, y compris la biodiversité et les services écosystémiques des systèmes de production agricole (Bélanger et Pilling, 2019).

Les événements climatiques extrêmes et les modifications imprévisibles des schémas saisonniers ont particulièrement touché l'agriculture traditionnelle non irriguée et les systèmes de production alimentaire domestiques en zones rurales, augmentant la vulnérabilité des populations à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle (IPCC, 2014 ; Powell et al., 2016). Les stress biotiques liés au changement climatique (mauvaises herbes invasives, ravageurs et maladies) affectent également la production agroalimentaire.

2. Tendances démographiques mondiales et pression sur la production agricole

2.1. Évolution de la population mondiale et de la production agricole

La population mondiale est passée d'environ 3,1 milliards d'habitants en 1962 à plus de 7,5 milliards fin 2018, avec une croissance constante de 81 millions par an (Fig. 1). Selon les projections, elle atteindra environ 8,5 milliards en 2030, 9,7 milliards en 2050 et 10,9 milliards en 2100 (Nations Unies, 2019). Le taux de croissance démographique devrait ralentir par rapport aux projections antérieures (notamment celles de 2019), en raison de la baisse continue des taux de fécondité observée dans de nombreuses régions du monde. Toutefois, dans certaines régions, la population devrait continuer d'augmenter au-delà de 2050, voire jusqu'à la fin du siècle. Par exemple, les Nations Unies (2019) indiquent que plus de 50 % de l'accroissement prévu (soit plus d'un milliard de personnes) au cours des 50 prochaines années proviendra de pays d'Afrique subsaharienne, où se trouvent les nations les plus pauvres du monde. Le Niger arrive en tête, avec le taux de croissance démographique le plus élevé (3,75 % entre 2015 et 2050 ; FAO, 2017). Par ailleurs, 70 % de la population mondiale vivra en zone urbaine d'ici 2050, contre 49 % en 2009 (FAO, 2009). Cette urbanisation aura des répercussions sur les systèmes alimentaires, car elle modifie profondément les habitudes alimentaires (FAO, 2017). Entre 1961 et 2018, les surfaces cultivées en céréales sont passées de 648 à 728 millions d'hectares, tandis que la production totale est passée de 877 à 2 963 millions de tonnes (Fig. 1). Bien que le rythme de croissance de la production ait ralenti, les superficies cultivées sont restées quasiment stables. La demande croissante en cultures, liée à l'explosion démographique, exerce une pression accrue sur les systèmes de production, entraînant soit l'intensification des terres agricoles existantes, soit leur extension vers de nouvelles zones.

L'évolution de l'occupation des sols se caractérise principalement par deux tendances majeures. D'une part, on observe une conversion accrue de terres en jachère et de zones forestières en surfaces cultivables, répondant ainsi à la nécessité d'accroître la production agricole. D'autre part, de nombreuses terres agricoles fertiles sont progressivement transformées en espaces urbanisés ou destinées à d'autres usages non agricoles, un phénomène bien documenté par les travaux de Geist et Lambin (2002), Graesser et al. (2015) et Kogo et al. (2019). Ce double dynamique, entre expansion des terres cultivées et rétrécissement des surfaces agricoles utiles, pose des défis majeurs pour la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale.

L'urbanisation, en particulier dans les pays en développement où les plans stratégiques à long terme font défaut, accélère cette conversion des terres agricoles (Rimal et al., 2018). D'ici 2030, les zones urbaines seront responsables de la disparition de 1,8 % à 2,4 % des terres cultivées

mondiales (entraînant une réduction de 3,4 % à 4,2 % des rendements), dont 80 % des pertes concerneront l'Asie et l'Afrique (d'Amour et al., 2017).

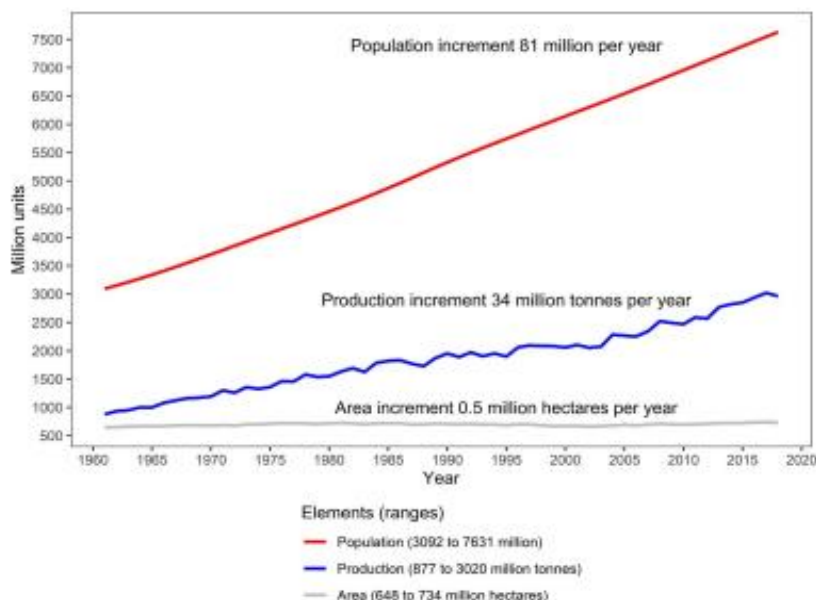


Figure 1. Tendances de la population mondiale et de la production céréalière sur la période 1961-2018. (Données basées sur les statistiques de <http://www.fao.org/faostat/fr/#data>)

2.2. Défis pour nourrir la population future

Les projections démographiques mondiales soulignent la nécessité d'accroître considérablement la production alimentaire pour répondre à la demande croissante. Selon les estimations, cette production devra augmenter de 50 % d'ici 2050 pour couvrir les besoins de la population supplémentaire (Chakraborty et Newton, 2011). Pourtant, aujourd'hui encore, environ 750 millions de personnes, soit une personne sur dix dans le monde, souffrent d'insécurité alimentaire grave et continuent de subir la faim (World Health Organization, 2020). Atteindre cet objectif est un défi de taille, exacerbé par les effets du changement climatique à travers divers facteurs de stress climatiques (Qaim, 2020 ; Shiferaw et al., 2011).

L'expansion agricole est également freinée par la disponibilité limitée des intrants essentiels, tels que les terres et l'eau (Garnett et al., 2013). Par exemple, le GIEC (IPCC, 2019) indique que l'agriculture pourrait représenter près de 70 % de l'utilisation mondiale d'eau douce. La terre, ressource rare, constitue un autre obstacle majeur à l'expansion agricole. De plus, cette expansion soulève des inquiétudes quant à ses impacts négatifs potentiels, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES), les dépôts excessifs d'azote et la destruction des

habitats. À elles seules, l'agriculture, la foresterie et les autres activités liées à l'utilisation des terres sont responsables de près d'un quart des émissions mondiales de GES qui alimentent le changement climatique (IPCC, 2019).

La durabilité du modèle agricole actuel est également remise en question. Si les tendances actuelles, agriculture intensive dans les pays développés et défrichement dans les pays en développement, se poursuivent, près d'un milliard d'hectares de terres seront convertis à d'autres usages d'ici trente ans, entraînant d'importantes émissions de GES (Tilman et al., 2011). Les problèmes environnementaux mondiaux liés au changement climatique s'aggravent et exercent une pression croissante sur la production agricole (Searchinger et al., 2019). Dans ce contexte, atteindre l'Objectif de développement durable « d'éliminer la faim d'ici 2030 » pourrait s'avérer encore plus difficile à l'avenir.

3. Le changement climatique : perspectives et définitions

Le changement climatique est un sujet largement débattu dans les milieux académiques, politiques et publics. Mais qu'est-ce que le changement climatique ? Les réponses varient selon les perspectives individuelles. Une idée répandue assimile le réchauffement climatique au changement climatique. Bien que le réchauffement en soit un indicateur majeur, il ne résume pas à lui seul le phénomène, qui mérite une conceptualisation scientifique plus approfondie.

3.1. Définitions fondamentales

Le climat peut se définir comme la moyenne des conditions météorologiques sur le long terme, tandis que le temps (météorologique) correspond à l'état quotidien de l'atmosphère terrestre (IPCC, 2007). L'atmosphère est un mélange de gaz (azote, oxygène, argon, CO₂) et de particules comme les nuages (Barry et Chorley, 2009). Sans ces éléments, elle ne différerait pas de l'espace intersidéral. Grâce à eux, le rayonnement solaire réchauffe l'atmosphère, modifiant ses paramètres : température, humidité, précipitations, pression atmosphérique, ensoleillement et vitesse du vent.

3.2. Variabilité temporelle : distinction fondamentale entre météo et climat

L'étude des phénomènes atmosphériques nécessite une approche temporelle duale. D'une part, le temps (météo) correspond aux conditions atmosphériques observables à un moment précis en un lieu donné, représentant ainsi une photographie instantanée de l'atmosphère. D'autre part, le climat s'appréhende comme la moyenne statistique de ces conditions météorologiques sur

une période minimale de trente ans, durée établie par la communauté scientifique (Zhai, P., et al, 2018). Ce cadre temporel permet d'englober les oscillations climatiques naturelles, comme les phénomènes El Niño (réchauffement périodique) et La Niña (refroidissement correspondant), dont l'influence serait source de biais statistique sur des échelles plus courtes. L'analyse des données thermiques globales (terres et océans confondus) entre 1880 et 2019 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) révèle une augmentation de 1,39°C par rapport à la moyenne du siècle dernier (1901-2000). Cette tendance se visualise particulièrement dans l'évolution des moyennes mobiles : tandis que la courbe quinquennale expose les fluctuations annuelles caractéristiques des cycles ENSO (El Niño-Southern Oscillation), la moyenne trentenaire, notablement plus stable, met en évidence la trajectoire ascendante et continue des températures, signature indubitable du changement climatique anthropique. Cette dichotomie entre variabilité météorologique à court terme et évolution climatique à long terme constitue un pilier fondamental de la climatologie moderne.

3.3. Changement climatique et variabilité naturelle

La compréhension des évolutions climatiques repose sur une distinction fondamentale entre deux phénomènes aux dynamiques et origines différentes. D'un côté, la variabilité climatique correspond aux fluctuations naturelles se manifestant à court terme (sur des périodes inférieures à 30 ans). De l'autre, le changement climatique désigne des modifications durables et persistantes du système climatique.

Cette différenciation s'articule principalement autour de leurs causes sous-jacentes : Le changement climatique actuel est majoritairement anthropique, provoqué par les activités humaines, notamment les émissions croissantes de gaz à effet de serre (GES) depuis la révolution industrielle.

À l'inverse, la variabilité climatique résulte de facteurs naturels, comme les éruptions volcaniques (injectant des aérosols dans l'atmosphère), les cycles océan-atmosphère (El Niño/La Niña), les variations de l'activité solaire, ou encore les cycles astronomiques de Milankovitch affectant l'insolation terrestre (IPCC, 2014).

Cette distinction est cruciale pour interpréter correctement les tendances climatiques et attribuer leurs causes, notamment dans un contexte où les effets de la variabilité naturelle peuvent temporairement masquer ou amplifier les signaux du changement climatique à long terme.

Pour renforcer cette explication, on pourrait ajouter des exemples concrets, comme l'influence d'un fort épisode El Niño sur les températures globales ou l'impact des éruptions majeures (ex. Pinatubo en 1991) sur le refroidissement temporaire du climat.

Chapitre 2 : Réchauffement climatique : causes, projections et conséquences agricoles

1. Origines du changement climatique contemporain

Les cycles naturels ne suffisent pas à expliquer le réchauffement récent (Santer et al., 2013). Les phénomènes périodiques comme El Niño et La Niña au 21^{ème} siècle ne compensent pas le réchauffement climatique à long terme (Easterling et Wehner, 2009). Paradoxalement, selon les oscillations orbitales du cycle de Milankovitch (excentricité, obliquité et précession axiale), notre planète devrait être engagée dans une phase de refroidissement entamée il y a 6000 ans (Buis, 2020 ; Markonis et Koutsoyiannis, 2013).

2. Les causes du réchauffement climatique : entre controverses et consensus scientifique

Le réchauffement climatique actuel fait l'objet de diverses interprétations, certaines controversées attribuant ce phénomène à des causes naturelles comme l'Oscillation Décennale du Pacifique (Meehl et al., 2016). Cependant, les études scientifiques démontrent que ce cycle climatique, bien que marqué (10-40 ans), ne fait que redistribuer la chaleur géographiquement sans affecter le bilan thermique global (Li et al., 2020 ; Meehl et al., 2021). D'autres théories, plus marginales, suggèrent même que l'augmentation du CO₂ serait une conséquence plutôt qu'une cause du réchauffement (Shakun et al, 2012). Ces positions sont pourtant contredites par l'accumulation de preuves scientifiques : d'une part, le rôle du CO₂ comme principal gaz à effet de serre est clairement établi ; d'autre part, l'origine anthropique des émissions actuelles ne fait plus de doute, les activités humaines (combustion d'énergies fossiles et déforestation) surpassant largement les sources naturelles (décomposition, volcanisme) comme l'ont montré Gerlach (2011), le IPCC (2014) et Nanda et al. (2016).

Les données climatiques actuelles sont sans équivoque : le réchauffement atteint déjà +1°C par rapport à la période préindustrielle (1850-1900) selon Buis (2020) et le IPCC (2018), avec une accélération notable de +0,76°C au cours des dernières décennies (Adhikari et al., 2015). Les projections pour 2100, basées sur différents scénarios (RCP), varient de +0,3 à +4,8°C (IPCC, 2013). L'analyse des anomalies thermiques persistantes depuis 1978 (Figure 3) confirme cette

tendance, qui devrait s'amplifier selon deux scénarios principaux : un réchauffement limité à $+0,3-1,0^{\circ}\text{C}$ dans le cas d'une atténuation forte (RCP 2.6), contre $+2,6-4,8^{\circ}\text{C}$ en cas de maintien des émissions actuelles (RCP 8.5). Ces éléments soulignent l'importance cruciale de distinguer entre la variabilité naturelle du climat et le forçage anthropique, ce dernier étant indéniablement le facteur déterminant des changements climatiques contemporains. La communauté scientifique s'accorde ainsi sur l'urgence d'une action concertée pour limiter l'impact des activités humaines sur le système climatique global.

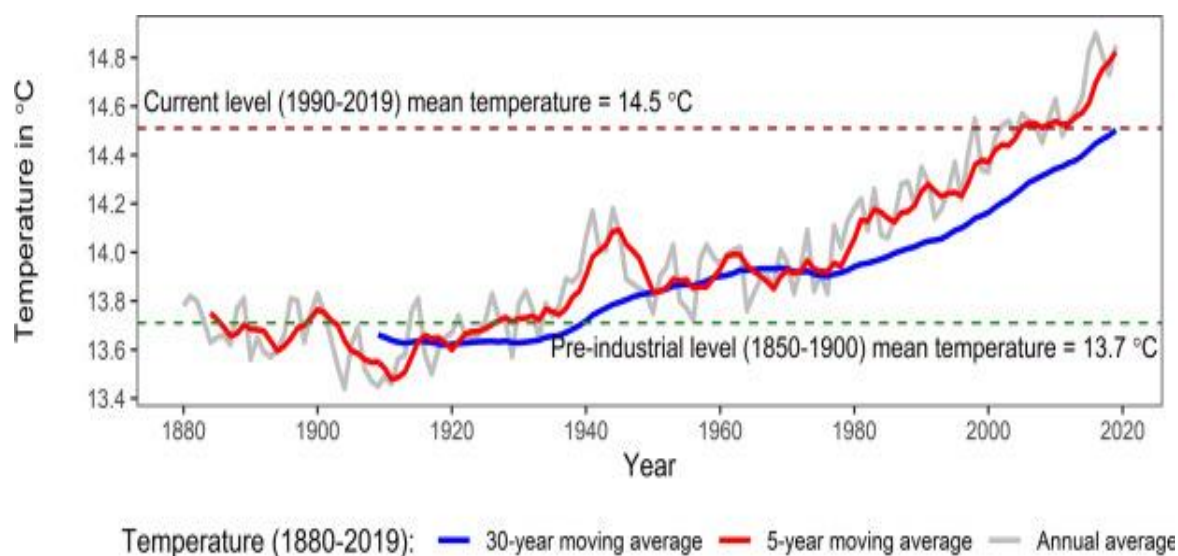


Figure 2. *Changement climatique et variabilité météorologique à court terme.*

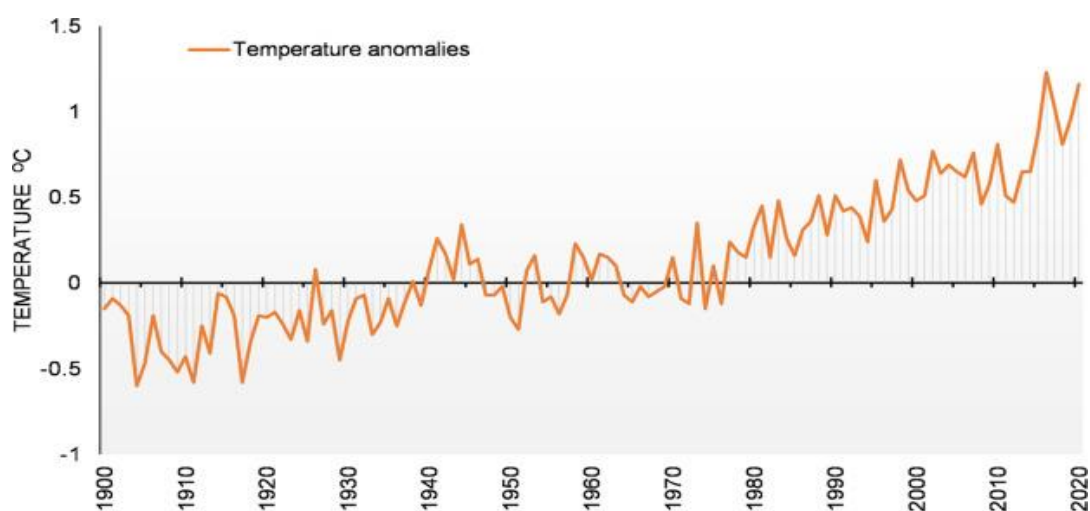


Figure 3. *Anomalies de température des terres et des océans à l'échelle mondiale par rapport à la période de référence de 1901 à 2000. L'anomalie négative (valeurs inférieures à 0°C) indique que la température observée était inférieure à la période de référence, tandis que l'anomalie positive (valeurs supérieures à 0°C) indique que la température observée était supérieure à la période de référence.*

3. Tendances climatiques et leurs répercussions sur l'agriculture

3.1. Contexte global

Le changement climatique et sa variabilité croissante constituent l'un des principaux défis environnementaux du XXI^e siècle, avec des répercussions majeures sur les systèmes agricoles (IPCC, 2014). La productivité des cultures, étroitement dépendante des conditions climatiques, se trouve particulièrement affectée par les modifications des régimes de températures et de précipitations, ainsi que par l'évolution des concentrations atmosphériques en CO₂. Comme l'ont montré Asseng et al. (2011) et Nelson et al. (2009), ces paramètres climatiques influencent directement la croissance végétale, la phénologie des cultures et, in fine, les rendements agricoles. Les principaux mécanismes d'impact concernent : (i) l'altération des cycles thermiques avec une augmentation des températures moyennes et extrêmes, (ii) la perturbation des régimes hydrologiques affectant la disponibilité en eau, et (iii) l'effet ambivalent du CO₂ - bien qu'actuant comme fertilisant pour la photosynthèse, son élévation s'accompagne de stress thermiques et hydriques susceptibles de contrebalancer cet avantage potentiel. Ces interactions complexes déterminent l'ampleur des impacts climatiques sur l'agriculture, nécessitant une évaluation fine des vulnérabilités régionales et le développement de stratégies d'adaptation appropriées.

3.2. Projections des changements thermiques et leurs conséquences agricoles

L'élévation des températures moyennes et extrêmes devrait profondément modifier les processus physiologiques végétaux, avec des répercussions majeures sur la production agricole. Les études scientifiques, notamment celles d'Ahmed et al. (2018), identifient plusieurs mécanismes d'impact clés : un dérèglement des cycles phénologiques se traduisant par des décalages dans les stades de développement des plantes, une intensification de la respiration végétale au détriment de l'accumulation de biomasse, ainsi qu'une altération des fonctions reproductives avec une baisse notable des taux de germination pollinique. Ces perturbations physiologiques conduisent in fine à une réduction de la période critique de remplissage des grains et à une diminution générale des rendements agricoles.

3.3. Vulnérabilité des cultures stratégiques

Les quatre piliers de la sécurité alimentaire mondiale - blé, riz, maïs et soja - représentant plus des deux tiers des apports caloriques de l'humanité, apparaissent particulièrement exposés à ces changements climatiques. Leur sensibilité différentielle aux stress thermiques pourrait remettre en cause les équilibres alimentaires globaux (tableau 1), avec des impacts variables selon les

régions et les systèmes de culture. Ces projections soulignent l'urgence de développer des variétés culturales plus résilientes et d'adapter les calendriers culturaux aux nouvelles réalités climatiques.

Tableau 1. Impact d'une augmentation de 1°C sur les moyennes de rendements :

Culture	Réduction de rendement
Blé	-6,0%
Riz	-3,0%
Maïs	-7,4%
Soja	-3,1%

Source : (Zhao et al., 2017)

Les pertes de rendement varient considérablement selon les scénarios climatiques. Plusieurs mécanismes expliquent ces effets : le stress thermique altère les protéines et enzymes essentielles, les modifications du cycle hydrique accroissent l'évapotranspiration, les relations plantes-pollinisateurs se trouvent perturbées, et le développement végétal plus rapide réduit la durée de remplissage des grains. Face à cette situation préoccupante, une adaptation urgente des systèmes agricoles s'impose, associant amélioration génétique, optimisation des pratiques culturales et renforcement des systèmes d'alerte précoce.

3.4. Projection des changements de température et de leur impact sur la production agricole

En Afrique, il est probable que la température moyenne annuelle augmente plus rapidement que la moyenne mondiale, entraînant une hausse de plus de 2°C d'ici le milieu du XXI^e siècle et de 4°C d'ici la fin du XXI^e siècle selon le scénario RCP 8.5 (IPCC, 2014). L'Afrique de l'Est devrait connaître la plus forte hausse de température par rapport au reste du monde, dépassant potentiellement 2–3°C et 4°C d'ici la fin du siècle, respectivement selon les scénarios B1 et A2.

Parmi les cultures de la région, le blé sera probablement très affecté, avec des rendements pouvant diminuer jusqu'à 72 % d'ici les années 2080 (Adhikari et al., 2015). Les cultures modérément touchées seront le maïs (rendements variants entre –45 % et +18 %), le riz (–15

% à +3 %), le mil (−17 % à +27 %) et les haricots (−12 % à +17 %). Le sorgho sera le moins impacté, avec des rendements pouvant rester dans une fourchette de ± 5 % par rapport à la production actuelle. D'autres cultures comme les racines et tubercules (patate douce, pomme de terre et manioc) seront aussi moins affectées, avec des rendements pouvant varier entre −15 % et +10 %.

Les zones actuellement adaptées à la culture du maïs pourraient voir leur superficie varier de 0,6 % à 0,8 % d'ici 2050 en Afrique subsaharienne (ASS) (une réduction de 1,3 % en Afrique de l'Ouest et centrale et de 1,3 % à 2,5 % en Afrique de l'Est et australe). D'ici 2080, les surfaces propices à la production de maïs devraient augmenter de 0,2 % à 2,3 % en ASS, grâce à l'expansion dans certaines zones d'Afrique de l'Est et australe, tandis qu'elles diminueront de 1,2 % à 1,4 %, principalement en Afrique centrale et de l'Ouest (Tesfaye et al., 2015).

En Chine, les températures ont augmenté au cours des 50 dernières années à un rythme de 0,38°C par décennie (Zhao et al., 2015). Cette hausse a eu un impact significatif sur la production agricole, affectant la croissance et la productivité des cultures, les rendements et les limites géographiques de plantation. Une augmentation des températures au-delà de 34°C risque d'avoir des effets néfastes sur le développement des cultures. Selon les projections, cela pourrait entraîner une baisse des rendements du maïs (3 % à 12 %) et du soja (7 % à 19 %) d'ici la fin du XXI^e siècle (Chen et al., 2016). Les besoins en eau des cultures et en irrigation pour la production rizicole dans le sud de la Chine pourraient augmenter de plus de 2 % et 5 % respectivement pour la période 2046–2065, puis de 5 % et 15 % entre 2081 et 2100 selon les scénarios SRA1B et SRB1 (Wang et al., 2012). Par ailleurs, les zones propices à la culture du riz devraient se déplacer vers le nord et l'ouest entre le milieu et la fin du XXI^e siècle.

L'Europe devrait connaître un réchauffement de 1,1 à 4,9°C d'ici 2050 (Holman et al., 2017), entraînant des contrastes régionaux : hausse des rendements blé (5-16%) en Europe du Nord mais baisse du maïs (1-14%), alors que l'Europe du Sud subirait des baisses plus importantes (blé : -4 à 22% ; maïs : jusqu'à -49%) (Hristov et al., 2020).

3.5. Projection des changements des précipitations et impacts sur les cultures

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans la production agricole. Cependant, les incertitudes liées à la température influencent davantage le changement climatique que celles associées aux précipitations (Lobell et Burke, 2008). Par le passé, les pertes les plus importantes

de productivité agricole ont résulté d'épisodes de sécheresse causés par de faibles précipitations (Krishna Kumar et al., 2004).

Les projections concernant les précipitations sont variables, avec des tendances à la hausse comme à la baisse selon les régions. Ces changements devraient affecter différemment les cultures et les zones géographiques. Cette situation est particulièrement marquée en Afrique en raison d'une plus grande vulnérabilité, liée à la forte dépendance à l'agriculture pluviale, à la variabilité climatique saisonnière et à la fréquence des événements météorologiques extrêmes (sécheresses et inondations) (IPCC, 2014).

En Afrique, les modifications des précipitations sont très hétérogènes : certaines zones devraient enregistrer une augmentation, tandis que d'autres subiraient une diminution. Une hausse des précipitations moyennes est notamment attendue dans les régions de haute altitude, en particulier en Afrique de l'Est. À l'inverse, une baisse des pluies est probable dans certaines parties du Sahel occidental et oriental (Christensen et al., 2007).

D'ici le milieu du XXI^e siècle, les défis liés à la diminution des précipitations devraient principalement se traduire par des pertes de rendement pour les cultures majeures : environ 2 % pour le sorgho, 18 % pour le maïs et 35 % pour le blé (Nelson et al., 2009).

L'Europe pourrait connaître une réduction de l'aptitude à la production agricole pluviale en raison des déficits pluviométriques. Par exemple, d'ici le milieu du XXI^e siècle, l'Europe centrale pourrait subir une baisse des rendements agricoles due à l'assèchement accru des sols (Ciscar et al., 2011). La région méditerranéenne de l'Europe devrait quant à elle enregistrer une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, incluant stress thermique, précipitations intenses et périodes de sécheresse prolongées, susceptibles d'affecter les rendements des cultures estivales (Moriondo et al., 2011). Dans le centre de la Chine, une augmentation de 30% des précipitations par rapport aux niveaux de 2000 pourrait accroître les rendements du maïs de 22,8% (Li et al., 2011).

3.6. Évolution projetée du CO₂ et impacts sur les cultures

Les concentrations atmosphériques mondiales de CO₂ ont connu une augmentation constante ces dernières années et devraient évoluer différemment selon divers scénarios d'émissions (Fig. 4). L'analyse des données du Climate Interactive Scoreboard montre que dans le scénario de référence (business as usual), les niveaux de CO₂, qui suivent une tendance à la hausse depuis 1900, pourraient dépasser 700 ppm avant la fin du XXI^e siècle. Le scénario prenant en compte les engagements nationaux ne montre aucun changement après la période de mise en œuvre des

contributions climatiques. Le scénario de limitation à moins de 2°C prévoit que tous les pays atteignent une concentration optimale d'ici 2030 avant de réduire progressivement leurs émissions. Quant au scénario 1,5°C, il implique que les pays développés atteignent leur pic d'émissions avant 2025 puis réduisent leurs émissions de 10% par an, tandis que les pays en développement devraient plafonner leurs émissions au plus tard en 2030 avant de les réduire de 8% annuellement. Ces deux derniers scénarios montrent une tendance claire à la diminution des émissions de CO₂.

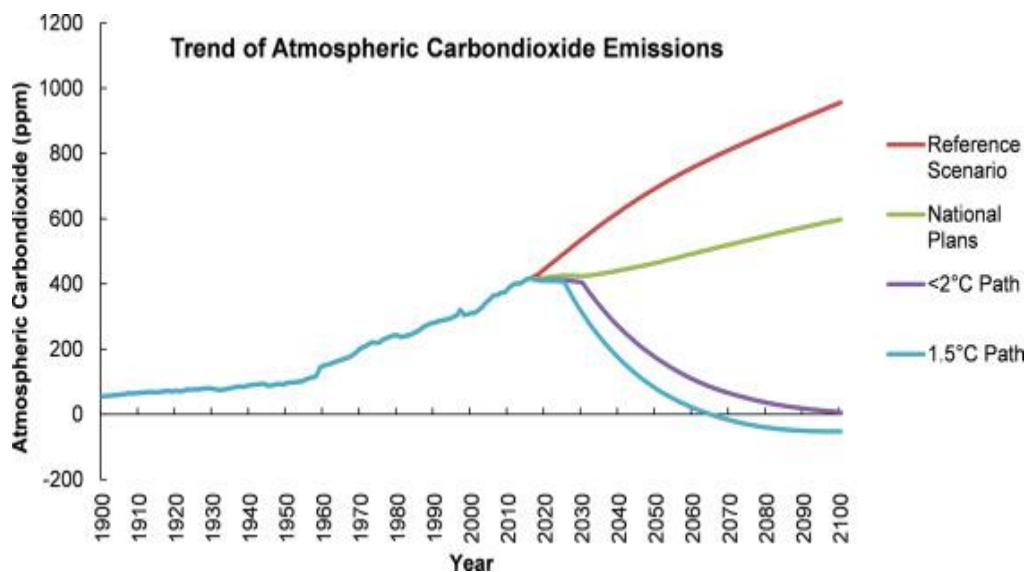


Figure 4. Trend of Atmospheric CO₂ emissions under different emission scenarios.

3.7. Effets du CO₂ sur la photosynthèse et le rendement des cultures

Le CO₂ constitue l'un des facteurs clés influençant la photosynthèse et la conductance stomatique des cultures, mécanismes à la base de l'effet fertilisant sur les rendements (Pignon & Long, 2020; Dusenge et al., 2019 ; Zhang et al., 2025). Une augmentation des concentrations de CO₂ à 550 ppm, niveau projeté pour le milieu du XXI^e siècle, devrait accroître de 38% l'activité photosynthétique des plantes en C₃ (riz, soja et blé). Des niveaux élevés de CO₂ augmentent l'absorption du carbone, réduisent la photorespiration et améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les espèces végétales en C₃ (McGrath et Lobell, 2013). Toutefois, ces espèces végétales présentent généralement une stimulation photosynthétique plus marquée sous

l'effet de concentrations élevées en CO₂ lorsque les températures dépassent 25°C (Chavan et al., 2019).

Les plantes en C4 (maïs et sorgho) ne réagissent pas directement à l'augmentation de l'activité photosynthétique induite par l'enrichissement en CO₂, mais plutôt à l'amélioration de l'efficacité hydrique résultant d'une conductance stomatique réduite et d'une concentration intracellulaire en CO₂ plus élevée, ce qui se traduit par une productivité accrue (Srinivasan et al. 2021). L'augmentation du CO₂ devrait entraîner, dans de nombreuses régions du monde, une hausse des rendements de maïs, soja, riz et blé respectivement de 7%, 24%, 16% et 17,5% d'ici les années 2080 (Parry et al., 2004). Des variations spatio-temporelles sont attendues en raison des différences régionales et des interactions entre le CO₂ atmosphérique, la température, les cultivars, l'humidité disponible et l'azote (McGrath et Lobell, 2013).

Bien que des concentrations élevées en CO₂ offrent une meilleure protection contre les effets des stress abiotiques sur les processus photosynthétiques, elles ne permettent pas de compenser les dommages causés par les températures extrêmes ou les niveaux de radiation élevés sur le processus reproductif des plantes.

4. Événements climatiques extrêmes et leurs impacts sur l'agriculture

Un événement climatique extrême, selon le GIEC, correspond à la survenue de valeurs météorologiques ou climatiques situées en dehors des fourchettes supérieures ou inférieures des observations à long terme (IPCC, 2014). Ce terme peut désigner tout phénomène météorologique ou climatique dont l'intensité, la durée ou la gravité excèdent les normales saisonnières. Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC avait déjà alerté sur le fait que ces événements extrêmes, dont la fréquence et l'intensité devraient s'accroître, constituent l'une des principales conséquences du changement climatique (IPCC, 2014). L'indice mondial de risque climatique 2020 a révélé qu'entre 1999 et 2018, environ 12 000 événements climatiques extrêmes ont été enregistrés dans le monde, causant 495 000 décès et des pertes économiques estimées à 3 540 milliards de dollars US (Eckstein et al., 2018). Le rapport souligne que les impacts les plus sévères ont été ressentis dans les pays en développement en raison de leur vulnérabilité accrue et de leurs capacités d'adaptation plus limitées. Les principaux types d'événements extrêmes observés à travers le monde incluent les sécheresses, les cyclones, les vagues de chaleur, les incendies, les pluies intenses et les inondations (Chhogyel et al., 2020 ; Nagy et al., 2018 ; Schaller et al., 2016).

Les effets néfastes de ces événements extrêmes ont été documentés à la fois sur l'environnement (Tomczyk et al., 2016 ; Ummenhofer et Meehl, 2017) et sur l'agriculture et la sécurité alimentaire des populations (Chatzopoulos et al., 2020 ; Cogato et al., 2019). L'exposition des cultures à ces conditions météorologiques défavorables entraîne principalement des pertes de production, attribuables à la réduction des surfaces récoltées et à la baisse des rendements (Lesk et al., 2016). Il a été estimé que 18 à 43 % de la variabilité des rendements agricoles peut être attribuée à ces événements climatiques extrêmes (Vogel et al., 2019). Il convient de noter que ces phénomènes affectent non seulement la croissance des cultures, mais aussi les pertes post-récolte. Par ailleurs, plusieurs études ont mis en évidence les conséquences de ces événements extrêmes sur la santé et le bien-être social des communautés (Wind et al. 2021; Hayes et al., 2018), ce qui pourrait indirectement affecter la productivité agricole et la production alimentaire. Dans ce contexte, le monde risque de faire face à une aggravation de la faim et des difficultés socio-économiques sous l'effet des changements climatiques futurs. Les sections suivantes présentent les impacts spécifiques des principaux événements climatiques extrêmes observés ces dernières années.

4.1. Sécheresse

La sécheresse constitue l'une des formes les plus courantes d'événements climatiques extrêmes, se caractérisant essentiellement par un déficit hydrique. On distingue quatre grands types de sécheresse : météorologique, hydrologique, agricole et socio-économique, résultant d'interactions complexes entre processus climatiques et systèmes de rétroaction terre-atmosphère (Tri et al., 2019 ; Van Loon et al., 2016). Dans le contexte du changement climatique, une augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses est anticipée, principalement due aux modifications des régimes pluviométriques et à l'élévation des températures (Gebrechorkos et al. 2025).

Ce phénomène naturel aléatoire et récurrent exerce des impacts dévastateurs sur la production agricole et les systèmes alimentaires, se traduisant par des baisses de rendement et des pertes de production susceptibles d'entraîner des pénuries alimentaires et des perturbations des chaînes d'approvisionnement. Une méta-analyse de Daryanto et al. (2017) révèle que les céréales et légumineuses soumises à un stress hydrique subissent respectivement des réductions de rendement de 20 % à 40 % et de 20 % à 85 %. De même, Fahad et al. (2017) rapportent des pertes de rendement dues à la sécheresse atteignant 53 % à 92 % pour le riz, 63 % à 87 % pour le maïs et 57 % pour le blé.

Ces perturbations accroissent considérablement l'incertitude, particulièrement pour les systèmes agricoles pluviaux, menaçant ainsi les moyens de subsistance des agriculteurs et la sécurité alimentaire, surtout dans les pays en développement. Lesk et al. (2016) ont montré que les sécheresses et les vagues de chaleur ont réduit les récoltes céréalières de 9 % à 10 % en moyenne dans les pays touchés entre 1964 et 2007, avec des pertes atteignant jusqu'à 19,9 % dans les régions à agriculture intensive, mais un impact encore plus dévastateur dans les pays en développement où la vulnérabilité structurelle (faible irrigation, petites parcelles, sécurité alimentaire précaire) amplifie l'effet des chocs climatiques. Par ailleurs, une synthèse mondiale de Daryanto et al. (2016) estimait que la sécheresse pourrait réduire les rendements du blé de 21 % et ceux du maïs de 40 %, confirmant que les cultures vitales comme le riz, le blé et le maïs sont parmi les plus fragiles face à l'intensification des événements de sécheresse

4.2. Inondations

Les inondations représentent un événement climatique extrême aux conséquences dévastatrices pour l'agriculture et la sécurité alimentaire, particulièrement dans les régions côtières et de basse altitude (Hasegawa et al., 2021; Schewe et al., 2019). Le GIEC indique avec un haut degré de confiance que les inondations côtières suivront une tendance à la hausse tout au long du XXI^e siècle en raison de l'élévation du niveau de la mer, un phénomène considéré comme une conséquence grave du réchauffement climatique (IPCC, 2014). Des études révèlent qu'en Chine, les inondations combinées aux sécheresses sont responsables de plus de 50 % des pertes agricoles (Guo et al., 2019).

Une évaluation des impacts des inondations dans quatre grands bassins fluviaux d'Asie du Sud-Est (Philippines, Indonésie, Thaïlande, Cambodge et Vietnam) indique qu'entre 42 000 et 1,3 million d'hectares de rizières ont été temporairement inondés chaque année entre 2020 et 2023, avec des projections climatiques anticipant une augmentation de 15 % à 70 % de la fréquence des crues à l'horizon 2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Institut de Recherche sur l'Asie du Sud-Est Contemporaine, 2025). Parallèlement, la submersion progressive des terres agricoles due à l'élévation du niveau de la mer et à la salinisation des sols est devenue l'une des principales causes de pertes de moyens de subsistance et de dégradation sociale au Bangladesh, avec jusqu'à 1,3 million d'hectares de terres arables déjà affectés par l'intrusion d'eau salée dans le delta du Gange-Brahmapoutre (Ashrafuzzaman et al., 2022).

Au-delà des zones côtières, les régions montagneuses subissent également une recrudescence des crues éclair et de l'érosion fluviale, provoquant des dommages importants aux infrastructures et aux systèmes agricoles à travers le monde (Hajdukiewicz et al., 2016 ; Stoffel

et al., 2016). Ces phénomènes mettent en lumière la vulnérabilité croissante des systèmes agricoles face aux extrêmes hydrologiques dans des contextes géographiques variés.

4.3. Cyclones

Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans et cyclones porte un coup sévère à l'agriculture et à la sécurité alimentaire. Les phénomènes combinés de vents violents, de pluies torrentielles et d'inondations de ruissellement provoquent des pertes de rendement rapides et durables : chaque cyclone tropical retire en moyenne 9 % à 10 % de la production céréalière des districts touchés, avec des écarts atteignant –38 % pour le riz lors des événements les plus intenses (Hasegawa et al., 2021). À l'échelle mondiale, la fréquence des ouragans de catégorie 4-5 a doublé depuis 1980 (Klotzbach et al., 2022), ce qui accroît mécaniquement l'exposition des systèmes agricoles.

Des exemples récents illustrent cette vulnérabilité. Le cyclone Amphan (mai 2020) a inondé 0,19 million d'hectares de rizières dans le sud-ouest du Bangladesh et fait chuter le rendement de 26 % à 38 % dans les upazilas (sous-district) les plus exposés, plongeant 2,6 millions de petits agriculteurs dans l'insécurité alimentaire immédiate (Basu, 2025). En Inde, le cyclone Yaas (mai 2021) a touché 1,5 million d'ha de cultures dans l'État du Bengale-Occidental ; les évaluations post-catastrophe évaluent les dommages à $\approx$ 530 millions USD, dont 70 % concernent l'infrastructure agricole et les stocks de semences. Dans les Caraïbes, la saison 2020 (ouragans Eta-Iota) a détruit > 90 % des cultures de bananes au Honduras et à la Guadeloupe, provoquant une chute de –37 % des exportations agricoles l'année suivante (UNCTAD, 2021). Aux Philippines, le typhon Rai (Odette, décembre 2021) a ravagé 138 000 ha de maïs et 42 000 ha de riz ; la perte de production est estimée à $\approx$ 210 000 t de riz, équivalent aux besoins annuels de 1,4 million de personnes (Philippine Department of Agriculture, 2022).

4.4. Vagues de chaleur et incendies

Il est généralement admis que l'une des principales conséquences du réchauffement climatique est l'augmentation des températures, entraînant une fréquence accrue des vagues de chaleur. Ces épisodes caniculaires constituent un facteur majeur de stress hydrique pour les cultures, affectant la production alimentaire par des échecs cultureux et des pertes de rendement. De nombreuses études ont documenté les graves impacts des vagues de chaleur extrêmes sur la production agricole dans différentes régions du monde (Pathak et al., 2018). La réduction des rendements sous l'effet de la chaleur s'explique par les effets des températures élevées sur la croissance, le développement et la physiologie des plantes cultivées (Carter et al., 2016). Une

revue bibliographique réalisée par Nadeem et al. (2018) a montré que le stress thermique réduisait les rendements grainiers de 31 % pour le blé, 45 % pour le maïs et 50 % pour le riz. Par ailleurs, une analyse multiméthode des projections de rendements mondiaux pour le blé, le maïs, le riz et le soja prévoit des réductions respectives de 6 %, 7,4 %, 3,2 % et 3,1 % (Zhao et al., 2017). L'augmentation des températures favorise également l'émergence de maladies et de ravageurs des cultures, aggravant ainsi les problèmes de perte de rendement et d'insécurité alimentaire sous l'effet du réchauffement climatique.

Outre la réduction des rendements, les vagues de chaleur ont également été associées à une augmentation des incendies entraînant la destruction totale de cultures et de cheptels. Au-delà des pertes matérielles et humaines, les incendies affectent indirectement la production agricole par divers mécanismes : perturbation des activités pollinisatrices des abeilles (Nicholson et Egan, 2020), dégradation de la qualité de l'air par la pollution, et impacts sur la santé humaine. Ces effets secondaires viennent amplifier les conséquences directes des événements thermiques extrêmes sur les systèmes agricoles.

À court et moyen terme, l'accroissement prévisible de la fréquence des événements climatiques extrêmes risque de déstabiliser profondément les systèmes agricoles et alimentaires mondiaux. Cette perturbation multidimensionnelle se manifestera notamment par : l'aggravation des pertes culturelles, la dégradation accélérée des infrastructures agricoles, et la dislocation des chaînes de valeur des produits de base. Les phénomènes tels que cyclones à forte intensité, inondations catastrophiques et précipitations extrêmes n'affecteront pas uniquement les cultures sur pied, mais également les infrastructures socio-économiques et les réseaux logistiques alimentaires, engendrant ainsi des pénuries généralisées et des crises alimentaires d'envergure.

La sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations se trouvera doublement compromise, tant en termes de disponibilité que d'accès aux denrées de base. Face à ce constat, les systèmes agricoles futurs devront impérativement relever deux défis majeurs : la réduction progressive des surfaces cultivables (sous l'effet combiné de l'érosion, des glissements de terrain, des inondations et de la salinisation) et la baisse structurelle des rendements (causée par les dommages directs aux cultures et la détérioration des conditions de croissance).

Dans ce contexte, l'adoption généralisée de technologies agricoles résilientes apparaît comme une condition sine qua non pour atténuer les effets du réchauffement climatique. Cette transition nécessitera toutefois une mobilisation internationale coordonnée et un soutien politique ambitieux, permettant la mise en œuvre de stratégies d'atténuation et d'adaptation différenciées selon les spécificités culturelles et régionales. Les exemples cités tout au long de cette analyse

illustrent avec acuité l'ampleur des impacts que les catastrophes naturelles induites par le climat exercent déjà - et exerceront plus encore à l'avenir - sur les systèmes agricoles et les moyens de subsistance des populations rurales à l'échelle mondiale.

Chapitre 3 : Les scénarios climatiques futurs

1. Introduction

Les scénarios d'émissions décrivent des évolutions futures plausibles des gaz à effet de serre (GES), des aérosols et d'autres polluants atmosphériques d'origine humaine. Ils reposent sur un ensemble cohérent d'hypothèses concernant les grands facteurs de changement, tels que l'évolution technologique, la croissance démographique, le développement socioéconomique, la demande énergétique, les changements dans l'usage des terres et la réponse du système climatique à long terme (IPCC 2001 ; Riahi et al. 2017). Les modèles climatiques prédisent l'évolution future du climat en se basant sur divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES), chacun fondé sur des hypothèses spécifiques (Alizadeh, 2022). D'après Hansen (2013), bien que de nombreux facteurs influencent les émissions mondiales à venir, les politiques d'atténuation jouent un rôle crucial dans la maîtrise des émissions d'origine humaine. Cela rend les projections d'émissions incertaines, car les scénarios proposés offrent différentes perspectives sur la manière dont l'avenir pourrait évoluer. La diversité des scénarios résulte des connaissances actuelles sur les évolutions socioéconomiques et technologiques possibles. Par conséquent, l'émergence de nouvelles données concernant les hypothèses sous-jacentes nécessite une mise à jour régulière de ces scénarios par la communauté scientifique.

Partant de l'hypothèse que le changement climatique est principalement dû aux activités humaines, le GIEC a élaboré plusieurs scénarios d'émissions. Leur objectif est de proposer une représentation simplifiée, mais plausible, de l'évolution future du monde selon différents aspects. Ces scénarios reposent sur des hypothèses concernant l'évolution des « forces motrices » influençant les émissions de gaz à effet de serre. Ils permettent également d'estimer les émissions futures de ces gaz. Utilisés comme données d'entrée pour divers modèles, ils servent à produire des projections dans plusieurs domaines, notamment en ce qui concerne le climat.

1.1. Les scénarios SA90 et IS92

Les scénarios d'émissions du GIEC, qui projettent les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) jusqu'en 2100, ont considérablement évolué depuis la publication du premier

rapport en 1990. À cette époque, les modèles climatiques s'appuyaient sur les scénarios d'émissions de type SA90 pour simuler l'évolution future du climat. Par la suite, dans son rapport complémentaire de 1992, le GIEC a introduit six nouveaux scénarios, désignés IS92a à IS92f (Leggett et al., 1992). Ces scénarios couvraient un large éventail d'hypothèses concernant les trajectoires possibles des émissions de GES, en partant du principe qu'aucune nouvelle politique climatique ne serait mise en œuvre au-delà de celles déjà en vigueur.

Selon Pepper et al. (1992), le scénario IS92a a rapidement été adopté comme référence dans de nombreuses études d'impact. Il était toutefois recommandé d'utiliser l'ensemble des six scénarios IS92 afin de refléter la diversité des incertitudes associées aux émissions futures. Parmi eux, le scénario IS92e présente les niveaux d'émissions les plus élevés, résultant d'une combinaison d'hypothèses : une croissance démographique modérée, une forte expansion économique, une grande disponibilité des combustibles fossiles et un retrait progressif de l'énergie nucléaire. À l'inverse, le scénario IS92c envisage une trajectoire où les émissions de CO₂ diminuent jusqu'à passer sous le niveau de 1990. Ce scénario repose sur une croissance démographique suivie d'un déclin à la moitié du XXI^e siècle, une croissance économique faible et une disponibilité limitée des ressources fossiles.

1.2. Les scénarios SRES

Avec l'accélération des CC observés et l'augmentation de la concentration des GES, le GIEC en 2000, a développé d'autres scénarios d'émission plus adaptés : les scénarios SRES. Dans le Rapport Spécial sur les Scénarios d'Émissions (Special Report on Emission Scenarios – SRES) publié par Nakicenovic (2000), les projections futures ont été regroupées en quatre grandes familles de scénarios. Cette classification repose sur trois hypothèses fondamentales : l'évolution démographique, le développement économique et social, ainsi que le progrès technologique et son orientation, notamment en ce qui concerne le recours aux énergies renouvelables. Ces familles de scénarios sont structurées de manière hiérarchique, allant de celles prévoyant un fort forçage radiatif dû à une utilisation intensive des énergies fossiles, à celles anticipant un faible forçage, grâce à une consommation réduite d'énergie et à l'adoption de technologies plus efficaces et durables.

Les quatre familles de scénarios SRES peuvent être résumées ainsi:

La famille de scénarios A1 décrit un futur globalisé caractérisé par une croissance économique rapide, une transition démographique aboutissant à un pic de population mondiale vers le milieu du XXI^e siècle suivi d'un déclin, ainsi qu'un déploiement accéléré de technologies énergétiques

avancées et efficaces. Ce scénario repose sur l'hypothèse d'une convergence économique entre les régions, accompagnée d'un renforcement des capacités institutionnelles et d'une intensification des échanges culturels et sociaux. L'un des résultats attendus est une réduction significative des disparités régionales en termes de revenu par habitant.

La famille A1 se subdivise en trois variantes, en fonction des trajectoires technologiques privilégiées dans le secteur énergétique :

A1FI (Fossil Intensive) : scénario fondé sur une forte dépendance aux combustibles fossiles, impliquant un forçage radiatif élevé.

A1T (Non-Fossil) : scénario axé sur le développement et la diffusion de sources d'énergie non fossiles.

A1B (Balanced) : scénario intermédiaire fondé sur une répartition équilibrée entre les différentes sources d'énergie, sans dominance particulière, en supposant des progrès technologiques homogènes dans l'ensemble du système énergétique et de la demande.

La famille de scénarios A2 envisage un monde caractérisé par une forte hétérogénéité entre les régions. Le scénario repose sur une logique d'autosuffisance régionale et de préservation des identités locales. La convergence des taux de fécondité est lente, entraînant une croissance démographique mondiale continue tout au long du XXI^e siècle. Le développement économique est principalement axé sur l'échelle régionale, avec une croissance économique par habitant modérée et un progrès technologique fragmenté et plus lent comparé aux autres scénarios. La disparité entre régions reste marquée, tant sur le plan économique que technologique.

Le scénario B1 décrit un monde globalement convergent, où la population mondiale atteint un maximum à la moitié du XXI^e siècle, suivi d'un déclin, à l'instar du scénario A1. Toutefois, il se distingue par une transition rapide vers une économie basée sur les services et l'information, accompagnée d'une réduction significative de l'intensité matérielle et d'une large adoption de technologies propres et efficaces. Ce scénario met l'accent sur la durabilité environnementale, sociale et économique à l'échelle mondiale, avec une meilleure équité entre régions. Cependant, il n'intègre pas d'interventions climatiques supplémentaires spécifiques.

La famille B2 propose un monde orienté vers des solutions locales et régionales en matière de durabilité environnementale, sociale et économique. La croissance démographique mondiale y est continue, mais à un rythme inférieur à celui du scénario A2. Le développement économique est modéré et inégal selon les régions, tandis que le progrès technologique y est plus lent et moins uniformément réparti que dans les scénarios B1 et A1. L'accent est mis sur la gestion

locale des ressources, la justice sociale et la préservation de l'environnement, sans coordination globale forte.

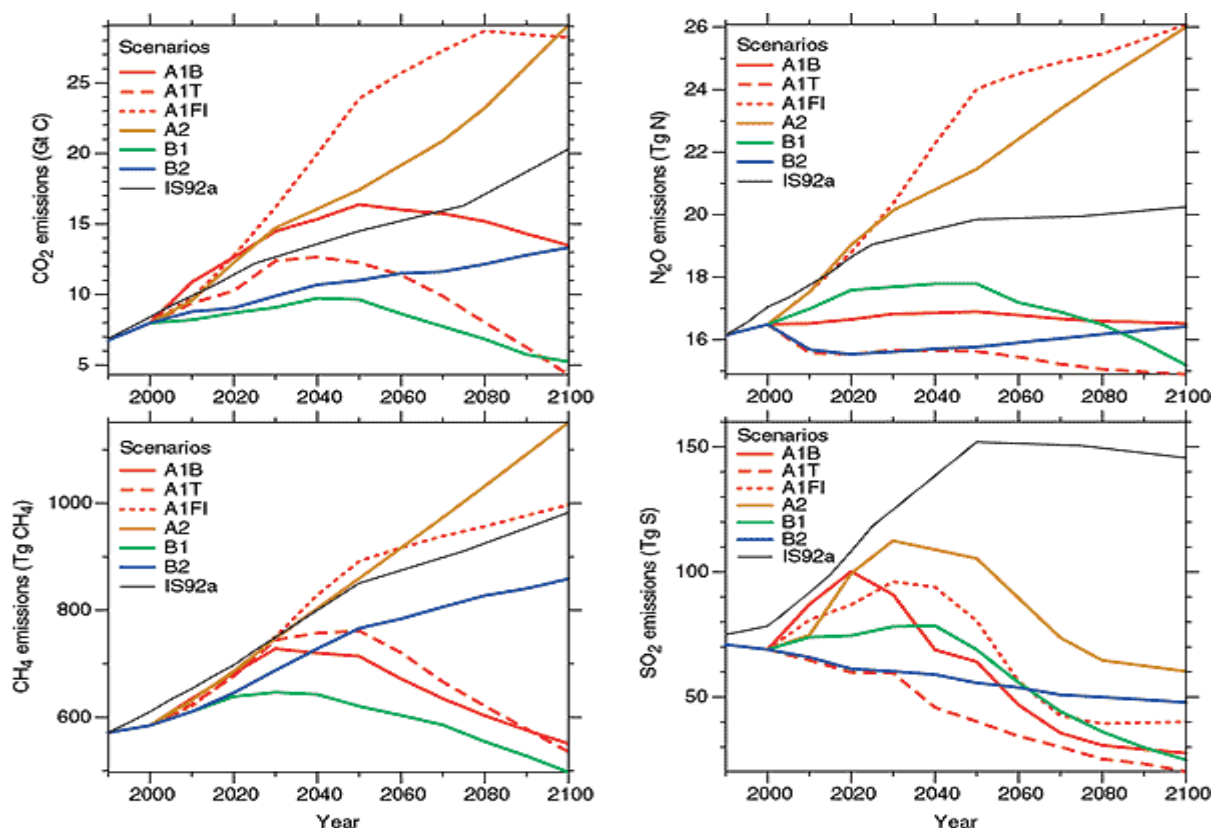


Figure 5. les émissions mondiales de CO₂ selon les six scénarios illustratifs du SRES (A1FI, A1B, A1T, A2, B1, B2, IS92a), jusqu'en 2100 (Source: IPCC. 2000).

1.3. Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway)

Depuis le début des années 2000, les transformations rapides des dynamiques socio-économiques et les progrès significatifs dans la compréhension du système climatique ont mis en évidence la nécessité de réviser les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) alors utilisés dans les travaux du GIEC. Ces scénarios présentaient plusieurs limitations importantes : les projections démographiques surestimaient la population mondiale en 2100 (en tablant sur 14 milliards d'individus, alors que les estimations les plus récentes convergent vers environ 10 milliards), le rôle croissant des pays émergents dans la croissance économique mondiale était sous-estimé, et les politiques climatiques adoptées au cours des deux dernières décennies n'étaient pas prises en compte dans les hypothèses initiales (van Vuuren et al., 2011). Pour corriger ces biais, une nouvelle génération de scénarios, appelés RCP (Representative Concentration Pathways), a été élaborée. Ces trajectoires ont servi de base scientifique au Cinquième Rapport d'Évaluation (AR5) du GIEC, publié en 2013.

Contrairement aux scénarios SRES, les RCP ne sont pas produits directement par le GIEC, mais résultent d'un processus coordonné mené par la communauté scientifique internationale afin de répondre aux besoins des évaluations climatiques (Moss et al., 2010). Cette transition s'accompagne d'un changement méthodologique majeur : l'approche linéaire et séquentielle des SRES — qui séparait les scénarios socio-économiques des projections climatiques — est remplacée par une approche parallèle et intégrée. Cette nouvelle méthode permet aux experts en sciences sociales de générer des scénarios d'émissions à partir de trajectoires de développement socio-économique et technologique, tandis que les climatologues utilisent simultanément ces données pour produire des projections climatiques (van Vuuren et al., 2012). Les scénarios RCP se déclinent en quatre trajectoires, identifiées selon le niveau de forçage radiatif total (en W/m²) atteint vers 2100 :

- RCP2.6 : scénario ambitieux de réduction des émissions, impliquant un pic puis une diminution des concentrations de CO₂, avec des hausses de température relativement limitées.
- RCP4.5 et RCP6.0 : scénarios intermédiaires dans lesquels des politiques climatiques modérées sont mises en œuvre.
- RCP8.5 : scénario fondé sur une poursuite des tendances actuelles sans efforts de réduction, avec une augmentation continue des concentrations de CO₂, menant à des hausses de température parmi les plus élevées projetées d'ici 2100 et au-delà.

Tableau 2. caractéristiques des scénarios RCP

Nom du scénario	Forçage radiative	Concentration (ppm équivalent CO ₂)	Trajectoire
RCP 2.6	Pic à ~3 W/m ² avant 2100, puis déclin	Pic à ~490 eq-CO ₂ avant 2100, puis déclin	Pic puis déclin
RCP 4.5	~4,5 W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 6.0	~6 W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 8.5	→ 8,5 W/m ² en 2100	→ 1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissante

Source : GREC-Sud, 2021

1.4. Les scénarios SSP

Alors que les modèles climatiques utilisent les Representative Concentration Pathways (RCP) comme base pour simuler l'évolution du climat, la communauté scientifique spécialisée dans les modèles d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Models, IAM) a élaboré un ensemble complémentaire de scénarios socio-économiques, désignés sous le nom de Shared Socio-economic Pathways (SSP). Ces scénarios visent à explorer les diverses trajectoires économiques, technologiques, sociales et politiques susceptibles de conduire à des niveaux spécifiques de concentration des gaz à effet de serre, et, par conséquent, à des formes particulières de changement climatique.

Dans ce cadre méthodologique renouvelé, les scénarios climatiques (RCP) et les scénarios socio-économiques (SSP) sont découplés, permettant ainsi l'adoption d'une approche matricielle pour l'analyse conjointe des impacts, de la vulnérabilité, ainsi que des coûts et bénéfices associés aux stratégies d'adaptation et d'atténuation. Cette matrice, souvent représentée graphiquement (Figure 6), croise en colonnes les différentes trajectoires de développement socio-économique (SSP) et en lignes les niveaux de forçage radiatif associés aux divers RCP. Bien que ce découplage vise à renforcer la flexibilité analytique, il n'est pas absolu : certains paramètres varient selon les combinaisons retenues, bien que les caractéristiques fondamentales des récits socio-économiques soient maintenues.

Chaque SSP repose sur un récit qualitatif décrivant les grandes tendances socio-économiques prévues à l'horizon 2100, telles que la croissance démographique, l'évolution du produit intérieur brut, le taux d'urbanisation, ou encore l'évolution des inégalités. Ces éléments sont accompagnés de données quantitatives cohérentes, qui servent d'entrées aux modèles IAM, ainsi qu'aux modèles d'impacts, de vulnérabilité et d'adaptation. Cette articulation entre narratifs qualitatifs et projections quantitatives, initiée dans le cadre des scénarios SSP (O'Neill et al., 2017 ; Riahi et al., 2017), vise à fournir un cadre cohérent et polyvalent pour l'évaluation des futurs possibles face aux enjeux climatiques.

Une première étape dans la construction des trajectoires climatiques intégrées consiste à utiliser les modèles d'évaluation intégrée (IAM) pour élaborer des scénarios de référence (ou baseline scenarios) ne comprenant aucune politique climatique explicite. Ces scénarios permettent d'examiner l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) en l'absence d'intervention politique. En fonction des interprétations du récit socio-économique (SSP) par les équipes de modélisation et des choix structurels propres à chaque modèle, les niveaux de forçage radiatif atteints dans ces scénarios de référence peuvent varier considérablement. Par conséquent, ils ne

correspondent pas nécessairement à un des RCP standards (Figure 6). Il est ainsi possible que certains scénarios conduisent à un forçage radiatif inférieur à $8,5 \text{ W/m}^2$ en 2100, même en l'absence de politiques climatiques, notamment en cas de progrès technologique rapide en faveur des énergies renouvelables ou de transitions comportementales vers des modes de vie sobres en carbone.

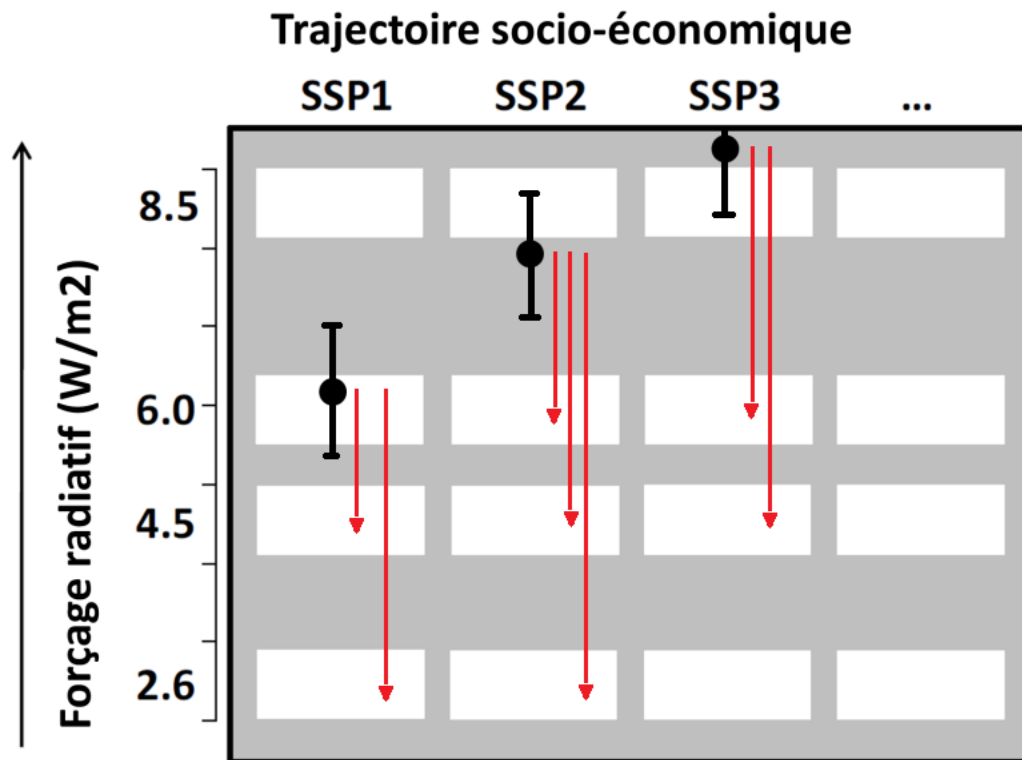


Figure 6. Architecture matricielle croisant les trajectoires socio-économiques (SSP) et les profils de concentration représentatifs (RCP). Chaque point illustre le niveau de forçage radiatif associé à un scénario de référence, tel qu'interprété par différents modèles. Les barres verticales traduisent l'incertitude liée à la variabilité des interprétations des SSP selon les équipes de modélisation. Les flèches rouges indiquent les efforts d'atténuation nécessaires pour atteindre des cibles spécifiques de forçage radiatif.

Dans une seconde phase, des scénarios intégrant des politiques climatiques, appelées SPA (Shared Policy Assumptions), sont élaborés afin d'explorer différents cadres de gouvernance climatique (accords globaux, participations différées, ou accords sectoriels). Ces politiques sont appliquées à la combinaison d'un scénario socio-économique (SSP) avec un niveau de forçage ciblé (RCP), produisant ainsi des scénarios intégrés positionnés dans la matrice SSP-RCP.

Cette architecture matricielle permet d'analyser les efforts d'atténuation requis pour atteindre différents niveaux de forçage selon les contextes socio-économiques, et inversement, d'étudier les impacts d'un même changement climatique dans des futurs contrastés. Toutefois, les coûts totaux ne se limitent pas aux actions d'atténuation ; ils incluent également les coûts d'adaptation et ceux des impacts résiduels (comme la dégradation des écosystèmes ou les effets sanitaires). Ces éléments sont évalués à l'aide de modèles d'impact, de vulnérabilité et d'adaptation. Ainsi, chaque cellule de la matrice représente une combinaison spécifique entre politiques climatiques et conséquences du changement climatique, offrant un cadre structuré pour explorer un large éventail de futurs possibles.

Afin d'assurer la pertinence et la robustesse de cette matrice d'analyse, les SSP doivent satisfaire plusieurs critères. D'une part, ils doivent couvrir une diversité suffisante de futurs possibles, tout en restant en nombre limité pour permettre leur exploitation cohérente par les différentes équipes de recherche. D'autre part, ils doivent être utilisables pour l'étude des trois dimensions majeures du changement climatique : les impacts, l'adaptation, et l'atténuation. De plus, pour être pleinement exploitables dans les études d'impacts, les scénarios doivent fournir des données désagrégées à différentes échelles spatiales.

Pour répondre à ces exigences, cinq SSP ont été définis sur la base de deux axes conceptuels : le premier reflète le niveau de défi lié à l'adaptation au changement climatique, le second le niveau de défi associé à l'atténuation des émissions de GES. L'objectif est ainsi de représenter cinq trajectoires contrastées occupant l'ensemble de l'espace défini par ces deux dimensions.

Les défis liés à l'adaptation sont caractérisés par la combinaison de trois composantes fondamentales :

- les déterminants socio-économiques de l'exposition aux risques climatiques ;
- les facteurs influençant la sensibilité des systèmes socio-économiques et écologiques aux changements climatiques ;
- les capacités d'adaptation institutionnelles, techniques et financières de ces systèmes.

Quant aux défis associés à l'atténuation, ils résultent de la combinaison de :

- la structure des déterminants d'émissions dans les scénarios de référence ;
- les éléments qui conditionnent la capacité des sociétés à réduire leurs émissions de GES, notamment les facteurs technologiques, économiques, institutionnels et comportementaux.

Lors de l'atelier tenu à Boulder (Colorado, États-Unis) en novembre 2011, cinq récits de scénarios socio-économiques types ont été définis, chacun décrivant une trajectoire plausible d'évolution mondiale selon deux axes : les défis liés à l'atténuation et ceux relatifs à l'adaptation au changement climatique :

SSP1 (faibles défis pour l'adaptation et pour l'atténuation) : Ce scénario décrit un monde caractérisé par une forte coopération internationale, une priorité accordée au développement durable, une gouvernance inclusive et une réduction significative des inégalités. Les transitions vers des technologies bas carbone sont rapides, soutenues par des politiques ambitieuses.

SSP2 (défis modérés pour l'adaptation et l'atténuation) : Représentant une poursuite des tendances actuelles, ce scénario occupe une position centrale dans l'espace des futurs possibles. Cependant, sa définition reste floue, car cette centralité peut résulter d'un équilibre entre dynamiques contradictoires ou d'une moyenne des trajectoires. Cela a conduit certains chercheurs à proposer plusieurs versions alternatives du SSP2 pour mieux refléter cette diversité.

SSP3 (défis élevés pour l'adaptation et l'atténuation) : Ce scénario dépeint un monde fragmenté, dominé par un nationalisme croissant, une faible coopération internationale, une croissance économique stagnante, et une attention prioritaire aux enjeux de sécurité et à l'autosuffisance. Les préoccupations environnementales y sont reléguées au second plan, et les politiques climatiques restent limitées.

SSP4 (défis élevés pour l'adaptation, mais faibles pour l'atténuation) : Ce scénario illustre un monde profondément inégalitaire, où une élite mondiale technophile et fortement émettrice de GES détient les ressources et le pouvoir décisionnel. Si cela facilite la mise en œuvre de politiques d'atténuation ciblées, la majorité de la population reste marginalisée, exposée à des conditions climatiques extrêmes et vulnérable par manque d'accès aux ressources et infrastructures.

SSP5 (faibles défis pour l'adaptation, mais défis élevés pour l'atténuation) : Il s'agit d'un scénario de développement rapide fondé sur une forte croissance économique, une dépendance élevée aux énergies fossiles, et une consommation énergétique importante. L'amélioration généralisée du niveau de vie accroît la capacité d'adaptation des sociétés, notamment par la réduction de la pauvreté, mais rend la décarbonation particulièrement difficile en raison des niveaux élevés d'émissions.

Les récits associés aux SSP offrent un niveau de détail suffisant pour assurer la cohérence interne des scénarios et servir de base aux analyses d'adaptation et d'atténuation, tout en laissant une marge de flexibilité pour intégrer des spécificités selon les objectifs de recherche (Kriegler et al., 2012). Après leur élaboration lors de l'atelier de Boulder (novembre 2011), ces récits ont été soumis à discussion lors d'une réunion organisée par le GIEC à La Haye en mai 2012, puis ouverts aux commentaires jusqu'en octobre 2012. Une version consolidée, intégrant les retours reçus, a été finalisée courant 2013, bien qu'elle reste sujette à de possibles mises à jour ultérieures (O'Neill et al., 2014).

Dans la continuité de ces travaux, trois équipes de recherche ont développé des trajectoires quantitatives pour les principaux déterminants socio-économiques des SSP : l'OCDE pour le PIB (Dellink et al., 2017), l'IIASA pour la population (KC & Lutz, 2017), et le NCAR pour l'urbanisation (Jiang & O'Neill, 2017). Ces trajectoires serviront d'entrées à cinq modèles d'évaluation intégrée (IAM), qui généreront les SSP « marqueurs », considérés comme représentatifs des récits socio-économiques initiaux (Riahi et al., 2017). Ces marqueurs ne constituent cependant pas les seules quantifications possibles ; ils fourniront des références pour la comparaison avec d'autres scénarios futurs (Calvin et al., 2017).

Parallèlement, d'autres chercheurs explorent de nouvelles méthodologies pour tirer parti de ce cadre. Par exemple, Schweizer & O'Neill (2014) mobilisent des analyses d'expertise afin d'évaluer la cohérence interne des scénarios, tandis que Rozenberg et al. (2014) proposent une méthode systématique pour sélectionner un ensemble réduit mais représentatif de scénarios pertinents et contrastés à partir de grandes bases de données, méthode qu'ils appliquent spécifiquement aux SSP.

2. Les projections climatiques futures selon les scénarios

Les projections climatiques futures constituent un socle fondamental de la science climatique contemporaine, permettant d'appréhender l'évolution probable du système Terre sous l'effet des forçages anthropiques. Reposant sur les scénarios socio-économiques (SSP) et les trajectoires radiatives représentatives (RCP) élaborés pour le Sixième Rapport d'évaluation du GIEC, ces scénarios intègrent des hypothèses contrastées de développement démographique, technologique et énergétique afin d'explorer l'espace des possibles climatiques jusqu'à 2100 et au-delà. La formalisation de ces trajectoires offre un cadre méthodologique robuste pour

quantifier les impacts potentiels sur les variables clés du climat et pour orienter les politiques d'atténuation et d'adaptation.

Au cœur de cette analyse se trouve une évaluation comparative des cinq trajectoires retenues – SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 – qui couvrent l'intervalle entre une décarbonation rapide et une perpétuation de l'usage intensif des combustibles fossiles. Chaque scénario est simulé par un ensemble de modèles de circulation générale couplés (CMIP6) afin de quantifier l'augmentation de la température moyenne de surface, l'élévation du niveau marin, l'évolution de la cryosphère arctique et l'acidification des océans. Ces variables, reconnues comme indicateurs emblématiques du changement climatique, permettent d'établir des liens directs entre trajectoires d'émissions et impacts physiques planétaires.

L'enjeu central de cette synthèse réside dans la capacité à traduire les incertitudes scientifiques en signaux décisionnels pour les acteurs publics et privés. Les résultats mettent en évidence la divergence marquée entre scénarios : tandis que SSP1-1.9 et SSP1-2.6 demeurent compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 conduisent à un réchauffement supérieur à 3 °C, ouvrant la voie à des boucles de rétroaction potentiellement irréversibles (Masson-Delmotte et al., 2021). Ainsi, l'analyse des projections climatiques futures ne se limite pas à une exposition des tendances physiques ; elle constitue un outil de prospective stratégique pour anticiper les risques systémiques et orienter les choix de transformation sociétale.

2.1. Température

Le cinquième rapport d'évaluation (AR5) du GIEC, basé sur les simulations du modèle climatique CMIP5 et d'autres sources, a confirmé que la température moyenne mondiale à la surface du globe (GSAT) continuera d'augmenter au cours du XXI^e siècle si les concentrations de gaz à effet de serre (GES) poursuivent leur hausse (Collins et al., 2013).

Selon les projections pour la période 2081–2100 par rapport à 1986–2005 :

- Sous le scénario à faibles émissions RCP2.6, l'augmentation de la GSAT est probablement comprise entre 0,3 °C et 1,7 °C.
- Sous le scénario à fortes émissions RCP8.5, elle serait comprise entre 2,6 °C et 4,8 °C.
- Pour les scénarios intermédiaires, RCP4.5 (pic des émissions vers 2040) et RCP6.0 (pic vers 2060), les hausses prévues se situent respectivement entre 1,1 °C–2,6 °C et 1,4 °C–3,1 °C.

Par ailleurs, le rapport indique avec un niveau de confiance élevé que la température moyenne mondiale durant 2081–2100 dépassera probablement 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle (1850–1900) dans les scénarios RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, et dépassera 2 °C dans les scénarios RCP6.0 et RCP8.5. Une hausse de plus de 2 °C dans le scénario RCP2.6 est jugée peu probable (confiance moyenne).

Les modèles climatiques CMIP6 projettent, pour la période 2081–2100 par rapport à 1995–2014, une augmentation de la température moyenne mondiale de surface (GSAT) comprise entre 0,6 °C et 2,0 °C selon le scénario à faibles émissions SSP1-2.6, dans lequel les concentrations de CO₂ atteignent un pic entre 2040 et 2060 (Tableau 3).

Pour le scénario à très fortes émissions SSP5-8.5, cette hausse se situe entre 2,7 °C et 5,7 °C. Les scénarios intermédiaires SSP2-4.5 et SSP3-7.0, où les concentrations de CO₂ continuent d’augmenter jusqu’en 2100 mais à un rythme moins rapide que SSP5-8.5, présentent des plages de 1,4 °C–3,0 °C et 2,2 °C–4,7 °C, respectivement. Enfin, le scénario le plus ambitieux en matière de réduction des émissions (SSP1-1.9) montre une hausse plus modérée, comprise entre 0,2 °C et 1,3 °C.

En résumé, les modèles CMIP6 indiquent une tendance générale à un réchauffement de surface global à long terme plus important que celui estimé par les modèles CMIP5, pour des scénarios équivalents (confiance très élevée).

Dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP2-4.5, les intervalles de variation (5–95 %) restent comparables à ceux des scénarios RCP2.6 et RCP4.5, mais les distributions sont décalées vers des températures plus élevées, d’environ 0,3 °C (confiance élevée). En revanche, dans le scénario SSP5-8.5 comparé à RCP8.5, la borne inférieure (5 %) change peu, tandis que la borne supérieure (95 %) et l’amplitude de la plage augmentent respectivement d’environ 20 % et 40 % (confiance élevée).

Cette hausse du réchauffement s’explique pour moitié par la présence, dans CMIP6, d’un plus grand nombre de modèles présentant une sensibilité climatique plus élevée par rapport à CMIP5. L’autre moitié est due à un forçage radiatif effectif plus important dans les scénarios pourtant considérés comme comparables (confiance moyenne).

Concernant les niveaux de réchauffement planétaire (GWL) de 1,5 °C, 2,0 °C et 3,0 °C par rapport à la période préindustrielle (1850-1900), les simulations CMIP6 montrent un consensus:

- Le seuil de 1,5 °C sera dépassé dans tous les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5, en moyenne autour de 2030.

- Le seuil de 2,0 °C sera franchi dans les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5, en moyenne vers 2043.
- Le seuil de 3,0 °C sera atteint sous SSP5-8.5, en moyenne vers 2062.

Sous le scénario à très faibles émissions SSP1-1.9, 55 % des modèles dépassent 1,5 °C et 36 % dépassent 2,0 °C. Ces proportions augmentent à 87 % et 58 % sous SSP1-2.6. Le moment du dépassement est défini comme la première année où la moyenne glissante sur 21 ans de la GSAT franchit le seuil considéré.

Les modèles CMIP6 projettent également des hausses de la température de l'air en surface, pondérées par la superficie, sur les continents, les océans, les régions tropicales (30°S–30°N), arctiques (67,7°N–90°N) et antarctiques (90°S–55°S), comme présenté dans le Tableau 3. Conformément aux évaluations précédentes (dont l'AR5), les températures annuelles moyennes en surface devraient augmenter d'environ 50 % de plus sur les terres que sur les océans, et la région arctique devrait se réchauffer à un rythme supérieur à 2,5 fois la moyenne mondiale.

Pour la période 2081–2100, par rapport à 1995–2014 :

- Le réchauffement projeté sur les terres varie entre 0,3 °C et 2,0 °C sous SSP1-1.9, et entre 3,5 °C et 7,6 °C sous SSP5-8.5.
- Pour la région arctique, les projections vont de 0,5 °C à 6,6 °C sous SSP1-1.9, et de 6,2 °C à 15,2 °C sous SSP5-8.5.

Tableau 3. Anomalies de la température annuelle moyenne de l'air en surface (°C) selon le CMIP6. Sont affichées les moyennes multi-modèles ainsi que, entre parenthèses, les intervalles de 5 à 95 %, pour certaines périodes, régions et SSP sélectionnés.

Période et région	SSP1-1.9 (°C)	SSP1-2.6 (°C)	SSP2-4.5 (°C)	SSP3-7.0 (°C)	SSP5-8.5 (°C)
Monde: 2021–2040					
Relative à 1995–2014	0.7 (0.3, 1.1)	0.7 (0.4, 1.1)	0.7 (0.4, 1.2)	0.7 (0.5, 1.2)	0.8 (0.5, 1.3)
Relative à 1850–1900	1.5 (1.1, 2.2)	1.6 (1.1, 2.2)	1.6 (1.0, 2.3)	1.6 (1.0, 2.4)	1.7 (1.2, 2.4)
Monde: 2041–2060					
Relative à 1995–2014	0.8 (0.3, 1.5)	1.0 (0.6, 1.6)	1.3 (0.8, 1.9)	1.4 (0.9, 2.3)	1.7 (1.2, 2.5)
Relative à 1850–1900	1.7 (1.1, 2.4)	1.9 (1.2, 2.7)	2.1 (1.5, 3.0)	2.3 (1.6, 3.2)	2.6 (1.8, 3.4)
Monde: 2081–2100					
Relative à 1995–2014	0.7 (0.2, 1.5)	1.2 (0.6, 2.0)	2.0 (1.4, 3.0)	3.1 (2.2, 4.7)	4.0 (2.7, 5.7)
Relative to 1850–1900	1.5 (1.0, 2.2)	2.0 (1.3, 2.8)	2.9 (2.1, 4.0)	3.9 (2.8, 5.5)	4.8 (3.6, 6.5)
Surface (Terre) : 2081–2100					
Relative à 1995–2014	0.9 (0.3, 2.0)	1.5 (0.8, 2.6)	2.7 (1.7, 4.0)	4.1 (3.0, 6.2)	5.3 (3.5, 7.6)
Océan: 2081–2100					
Relative à 1995–2014	0.6 (0.1, 1.2)	1.0 (0.5, 1.8)	1.8 (1.2, 2.7)	2.7 (1.8, 4.0)	3.4 (2.3, 4.9)
Tropicale : 2081–2100					
Relative à 1995–2014	0.5 (0.1, 1.1)	1.0 (0.5, 1.6)	1.8 (1.2, 2.5)	2.7 (2.0, 4.0)	3.5 (2.4, 4.9)
Arctique : 2081–2100					
Relative à 1995–2014	2.4 (0.5, 6.6)	3.3 (0.4, 7.5)	5.4 (2.8, 10.0)	7.7 (4.5, 13.4)	10.0 (6.2, 15.2)
Antarctique : 2081–2100					
Relative à 1995–2014	0.5 (0.0, 1.1)	1.1 (0.1, 2.9)	1.9 (0.6, 3.2)	2.8 (1.3, 4.5)	3.6 (1.7, 5.6)

Source : Lee, J. Y., et al. 2021

2.2. Précipitations

Les précipitations annuelles mondiales sur les terres augmenteront au cours du XXI^e siècle à mesure que la température moyenne globale de surface (GSAT) augmentera (forte confiance). La fourchette probable de variation des précipitations annuelles moyennes mondiales sur les terres entre 2081 et 2100 par rapport à la période 1995–2014 est de –0,2 à +4,7 % dans le scénario à faibles émissions SSP1-1.9, et de 0,9 à 12,9 % dans le scénario à fortes émissions SSP5-8.5, selon l'ensemble des modèles CMIP6 disponibles. Les fourchettes probables correspondantes sont de 0,0 à 6,6 % pour SSP1-2.6, de 1,5 à 8,3 % pour SSP2-4.5, et de 0,5 à 9,6 % pour SSP3-7.0 (Lee, J. Y., et al. 2021).

Les changements de précipitations présenteront des différences régionales importantes et des contrastes saisonniers à mesure que la température moyenne globale de surface (GSAT) augmentera au cours du XXI^e siècle (forte confiance). Avec le réchauffement, une plus grande superficie terrestre connaîtra des augmentations ou diminutions statistiquement significatives des précipitations (confiance moyenne). Il est très probable que les précipitations augmentent aux hautes latitudes et sur les océans tropicaux, et probables qu'elles augmentent dans de vastes régions de la zone de mousson, mais qu'elles diminuent probablement dans une grande partie des régions subtropicales en réponse au réchauffement induit par les gaz à effet de serre. La variabilité interannuelle des précipitations sur de nombreuses régions terrestres augmentera avec le réchauffement climatique (confiance moyenne).

Les changements projetés à court terme des précipitations sont incertains, principalement en raison de la variabilité interne naturelle, de l'incertitude liée aux modèles et de l'incertitude concernant les forçages des aérosols naturels et anthropiques (Tan, X., et al. 2023). À court terme, aucun changement discernable des précipitations n'est prévu entre les différents scénarios SSP. Le forçage des aérosols anthropiques diminue dans la plupart des scénarios, contribuant à une augmentation de la GSAT et des précipitations moyennes mondiales sur les terres.

En réponse au réchauffement induit par les gaz à effet de serre, il est probable que les précipitations de la mousson sur les terres mondiales augmenteront, particulièrement dans l'Hémisphère Nord, bien que la circulation de la mousson dans l'Hémisphère Nord risque de s'affaiblir. À long terme (2081–2100), le changement des précipitations de la mousson présentera une asymétrie nord-sud caractérisée par une augmentation plus importante dans l'Hémisphère Nord que dans l'Hémisphère Sud, et une asymétrie est-ouest caractérisée par une augmentation dans les régions de la mousson Asie-Afrique et une diminution dans la région de

la mousson en Amérique du Nord. Les changements à court terme des précipitations et de la circulation de la mousson mondiales sont incertains en raison de l'incertitude des modèles et de la variabilité interne, telle que la variabilité multi-décennale de l'Atlantique et la variabilité décennale du Pacifique (Lee, J. Y., et al. 2021).

Il est probable qu'au moins une grande éruption volcanique se produira au cours du XXI^e siècle. Une telle éruption réduirait la température moyenne globale de surface (GSAT) pendant plusieurs années, diminuerait les précipitations mondiales moyennes sur les terres, altérerait la circulation de la mousson, modifierait les précipitations extrêmes et changerait le profil de nombreux moteurs d'impact climatique régional. Un scénario peu probable mais à fort impact serait celui de plusieurs grandes éruptions volcaniques qui modifieraient considérablement la trajectoire climatique du XXI^e siècle par rapport aux projections des modèles de systèmes terrestres basées sur les scénarios SSP.

3. Tendances Observées et Projetées du Réchauffement Climatique en Algérie

Le changement climatique mondial se manifeste avec des intensités variables selon les régions, certaines d'entre elles connaissant un réchauffement significativement plus rapide que la moyenne mondiale. Située en Afrique du Nord, l'Algérie couvre une diversité de zones climatiques allant de la côte méditerranéenne au Sahara central, et fait partie des régions affichant un signal de réchauffement particulièrement marqué. La partie présente une analyse des tendances historiques de température basée sur les données instrumentales, et explore les projections climatiques futures selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

3.1 Températures

3.1.1. Tendances Observées (2000–2023)

L'analyse des enregistrements de température entre 2000 et 2023 montre que l'Algérie connaît une tendance de réchauffement prononcée. La température moyenne de l'air en surface a augmenté à un rythme de 0,49 °C par décennie, dépassant largement la moyenne mondiale contemporaine de 0,37 °C par décennie (IPCC, 2021). Les données issues de stations sur le long terme révèlent également qu'à partir des années 1960, la tendance au réchauffement a dépassé 2,7 °C par siècle dans certaines localités, soulignant la persistance et la cohérence spatiale de ce signal climatique régional.

3.1.2. Tendances projetées (2024-2100)

Les projections climatiques basées sur les modèles du CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) ont été évaluées selon deux scénarios socio-économiques partagés (SSP) : un scénario à faibles émissions (SSP1-2.6) et un scénario à fortes émissions (SSP5-8.5). Toutes les projections sont exprimées par rapport à la période de référence préindustrielle (1850–1900).

A. Scénario à Faibles Émissions (SSP1-2.6) ; Dans ce scénario conforme aux trajectoires visant à limiter le réchauffement mondial à bien en dessous de 2 °C, la température annuelle moyenne en Algérie devrait augmenter d'environ +2,6 °C d'ici 2100. Malgré les efforts d'atténuation, la fréquence des épisodes de chaleur extrême resterait élevée. En particulier, le nombre de jours avec des températures maximales (T_{max}) dépassant 35 °C devrait doubler dans les régions côtières.

B. Scénario à Fortes Émissions (SSP5-8.5) ; En l'absence de politiques d'atténuation significatives, l'Algérie pourrait connaître une augmentation moyenne annuelle des températures de +5,6 °C à +6,2 °C d'ici la fin du XXI^e siècle. Dans le nord du pays, le nombre de jours avec $T_{max} \geq 35$ °C pourrait dépasser 200 jours par an. Dans les régions sahariennes, les températures maximales journalières pourraient dépasser régulièrement les 50 °C, avec des conséquences graves sur l'habitabilité et les infrastructures.

3.2. Précipitation : tendances observées et projections

Le changement climatique a d'ores et déjà profondément modifié le régime des précipitations en Algérie et continuera de le faire à l'avenir, selon deux dynamiques apparemment contradictoires, mais tout aussi préoccupantes : une tendance à l'assèchement progressif dans le nord du pays, densément peuplé, et une intensification des précipitations extrêmes dans l'ensemble du territoire, y compris dans le sud saharien. Ce phénomène s'inscrit dans un schéma plus large typique du bassin méditerranéen : « le sec devient plus sec, l'humide devient plus extrême ».

3.2.1. Réduction des précipitations dans le nord de l'Algérie

Les données historiques montrent une diminution significative des précipitations moyennes dans le nord de l'Algérie : entre 1942 et 2004, elles ont chuté de 40 % à l'ouest, 30 % au centre et 20 % à l'est par rapport aux moyennes du milieu du XX^e siècle, tandis que la station d'Oran a enregistré une baisse de 15 % sur la période 1926-2006 (ANRH, 2009).

Les projections climatiques confirment cette tendance : D'ici 2081-2100, par rapport à la période de référence 1986-2005, une diminution de 22 % à 35 % est attendue, selon les scénarios d'émissions faibles ou élevées.

La saison hivernale, qui concentre l'essentiel des précipitations, pourrait enregistrer une perte de 20 à 40 % de ses apports. Cela se traduirait par un déficit supplémentaire estimé à 81 mm dans la zone MENA septentrionale d'ici 2050 (Majdi et al. 2022).

3.2.2. Augmentation des précipitations extrêmes dans le sud algérien

À l'inverse, les projections indiquent une possible augmentation des précipitations moyennes dans le sud du pays, notamment sous un scénario d'émissions élevées (SSP5-8.5 / >3 °C) :

Une hausse allant jusqu'à 71 % des précipitations annuelles est envisageable dans les régions sahariennes d'ici la fin du siècle.

Toutefois, ces précipitations supplémentaires se manifesteraient majoritairement sous forme d'événements brefs et intenses, dépassant les capacités d'absorption des sols arides, et provoquant des crues éclair et des débordements d'oueds.

3.2.3. Fréquence accrue des événements climatiques extrêmes

À l'échelle nationale, l'intensification des événements extrêmes est déjà observable : Entre 2010 et 2022, l'Algérie a connu une forte augmentation des épisodes d'inondation (Kheloufi-Attou et al. 2023).

Sur les 60 dernières années, 60 % des catastrophes naturelles recensées dans le pays étaient liées à des inondations, touchant plus de 800 000 personnes et générant des pertes économiques estimées à plus de 1,5 milliard de dollars.

Les modèles climatiques anticipent également une augmentation des précipitations journalières maximales, même dans les régions où les précipitations annuelles totales sont en baisse.

3.2.4. Contrastes régionaux à l'horizon 2100 (scénario à fortes émissions)

L'Algérie constitue un exemple emblématique des dynamiques climatiques du bassin méditerranéen, où les régions déjà arides deviennent plus sèches, tandis que les précipitations, là où elles augmentent, se concentrent sous forme d'épisodes extrêmes. Ce double dynamique accentue l'insécurité hydrique, fragilise les systèmes agricoles et alimentaires, et augmente considérablement les risques de catastrophes naturelles.

Tableau 4. Évolution projetée des précipitations annuelles et des risques climatiques par région en Algérie

Région	Variations annuelles des précipitations	Risques principaux
Côte nord	–35 %	Sécheresse chronique, incendies, pénurie d’eau
Hautes plaines	–20 % à –30 %	Désertification, perte des parcours
Sud saharien	+0 % à +71 %	Crues soudaines, dommages aux infrastructures

3.3. Impacts possibles sur Algérie

Entre 2000 et 2023, l’Algérie a connu une élévation notable des températures, entraînant des impacts sectoriels majeurs, en particulier sur l’énergie, la santé, les ressources en eau et les systèmes socio-économiques. Le territoire se réchauffe plus rapidement que la moyenne mondiale, avec des projections indiquant une hausse de la température annuelle moyenne allant de +2,6 °C à plus de +6 °C d’ici 2100, selon les trajectoires d’émissions futures.

Cette dynamique climatique a déjà engendré une augmentation d’environ 35 % des degrés-jours de refroidissement, indicateur clé de la demande en climatisation. Si les émissions restent élevées, la consommation d’électricité liée au refroidissement pourrait croître de plus de 50 % à l’horizon 2050. Ce phénomène met en tension les infrastructures énergétiques existantes, posant des défis en matière de fiabilité et de résilience du réseau électrique.

Sur le plan sanitaire, l’exposition croissante aux vagues de chaleur, particulièrement pour les personnes âgées, laisse entrevoir une forte hausse de la mortalité liée à la chaleur. Dans un scénario sans atténuation, ce taux pourrait atteindre environ 69 décès annuels pour 100 000 personnes de plus de 65 ans d’ici 2080, contre 6 pour 100 000 sur la période 1961–1990. En revanche, des politiques climatiques ambitieuses permettraient de contenir ce taux à environ 16 décès.

Par ailleurs, la hausse des températures accentue la demande évaporative, avec une élévation estimée de 7 à 10 % de l’évapotranspiration potentielle (ETP) par degré supplémentaire. Ce

facteur exacerbe la fréquence et l'intensité des sécheresses, menaçant la disponibilité des ressources hydriques, en particulier dans les systèmes agricoles pluviaux et les zones pastorales.

Les conséquences sur les ressources en eau sont déjà visibles. Le déplacement vers le nord de l'isohyète des 300 mm favorise la désertification, qui touche près de 50 millions d'hectares. L'érosion des sols, aggravée par des pluies intenses sur des terrains desséchés, accélère l'envasement des barrages, réduisant encore leur capacité de stockage. Actuellement, le déficit des barrages est estimé à environ 25 %, certains réservoirs étant complètement asséchés. Cela entraîne des rationnements sévères (distribution d'eau tous les 2 à 3 jours) et la mise en œuvre d'un programme d'urgence de dessalement d'un montant de 5,4 milliards de dollars.

4. Limites et incertitudes des projections climatiques

Les projections climatiques constituent un outil fondamental pour comprendre les évolutions futures du climat et orienter les politiques d'atténuation et d'adaptation. Elles reposent principalement sur des modèles climatiques, dont la complexité et le niveau de sophistication se sont accrus au fil des décennies. Cependant, malgré les avancées scientifiques, ces projections restent entachées d'un certain nombre d'incertitudes, qu'il est essentiel de comprendre et de quantifier pour interpréter correctement les résultats des simulations climatiques et en faire un usage approprié dans les processus décisionnels. En effet, bien que de nombreux travaux aient récemment été menés pour quantifier les impacts du changement climatique sur les ressources en eau (Kim et al., 2019), leurs résultats doivent toujours être interprétés avec prudence, car ils sont affectés par des incertitudes provenant de différentes sources (Pastén-Zapata et al., 2022). Comme cela a été mentionné, ces incertitudes peuvent se propager tout au long de la chaîne de modélisation, du scénario d'émissions aux modèles d'impact, en passant par les modèles climatiques globaux (GCM) et les méthodes de régionalisation, et il demeure difficile de les quantifier précisément ou de les réduire à chaque étape (Chokkavarapu et Mandla, 2019). C'est pourquoi l'évaluation des impacts du changement climatique devrait toujours être accompagnée d'analyses de sensibilité appropriées, réalisées dans un cadre probabiliste.

4.1. Sources principales d'incertitude

Les incertitudes dans les projections climatiques peuvent être regroupées en trois grandes catégories : les incertitudes liées aux scénarios socio-économiques, les incertitudes liées aux modèles climatiques, et les incertitudes internes ou naturelles (Figure 7).

4.1.1. Incertitude liée aux scénarios d'émissions (ou incertitude socio-économique)

Les projections climatiques reposent sur des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre, élaborés à partir de différentes hypothèses concernant les trajectoires futures de développement économique, démographique, technologique et politique. Depuis les années 1990, le GIEC développe des scénarios d'émissions à long terme afin de modéliser l'évolution potentielle des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en fonction de multiples trajectoires plausibles (IPCC, 2007). Ces scénarios ont été représentés dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5) par les Representative Concentration Pathways (RCPs), notamment RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, correspondant chacun à un niveau approximatif de forçage radiatif à l'horizon 2100 (Noto et al., 2022). Plus récemment, le sixième rapport (AR6) a introduit une nouvelle génération de scénarios combinant cinq trajectoires socio-économiques partagées (SSPs), de SSP1 à SSP5, et sept niveaux de forçage radiatif (1.9 à 8.5 W/m²), permettant d'explorer une plus grande diversité de futurs possibles intégrant à la fois les dynamiques sociales et les réponses politiques en matière de mitigation et d'adaptation (O'Neill et al., 2017).

La sélection d'un scénario d'émission pertinent n'est jamais évidente, car elle doit tenir compte de nombreuses variables imprévisibles (Jose et Dwarakish, 2020). Pour cette raison, il est recommandé de ne pas se limiter à un seul scénario « moyen » ou « optimal », mais plutôt de considérer une gamme de trajectoires possibles, en particulier dans le cadre d'analyses d'impacts à long terme (Talchabhadel et Karki, 2019; Kundzewicz et al., 2018). Par ailleurs, comme le souligne Vetter et al. (2017), l'influence des incertitudes liées aux scénarios d'émissions sur les modèles climatiques varie en fonction de l'horizon temporel des projections.

Il est important de noter que ces scénarios ne peuvent pas anticiper toutes les éventualités, ni prévoir avec précision l'évolution des facteurs déterminants des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols — tels que la croissance de la population, les changements dans l'usage des sols, les politiques énergétiques, les innovations technologiques, ou encore les événements géopolitiques. À cet égard, des événements récents comme la pandémie de COVID-19 ou les conflits entre les pays illustrent bien le caractère imprévisible de certains facteurs ayant un impact direct sur les émissions globales. Par exemple, Le Quéré et al. (2020) ont estimé que les émissions mondiales de CO₂ issues des énergies fossiles ont diminué de près de 17 % au début du mois d'avril 2020 par rapport à la moyenne de 2019, en raison des restrictions de déplacement et de la baisse de la demande énergétique. De même, la guerre en Ukraine a profondément perturbé les marchés mondiaux de l'énergie, entraînant des modifications

majeures dans les politiques de production, de distribution et de consommation d'énergie, avec des implications significatives sur les émissions de CO₂. Ces incertitudes renforcent la nécessité d'une lecture prudente et nuancée des scénarios d'émissions existants.

4.1.2. Incertitude liée aux modèles climatiques

Les modèles climatiques, et en particulier les modèles climatiques globaux (GCMs), constituent l'un des outils majeurs pour simuler la réponse du système climatique face à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Ils reposent sur des formulations numériques représentant les processus physiques, dynamiques et thermodynamiques affectant l'atmosphère, les océans, la cryosphère et la biosphère. Toutefois, le système climatique étant intrinsèquement complexe, non linéaire et dynamique, la connaissance des comportements individuels de ses composants ne garantit pas une compréhension complète de son fonctionnement global (Woldemeskel et al., 2014).

L'une des principales sources d'incertitude associées aux GCMs provient de la structure même des modèles, de leur paramétrisation des processus sous-échelle, et du choix des conditions initiales utilisées pour lancer les simulations. De nombreux processus climatiques clés, tels que les précipitations, ne peuvent être modélisés de manière explicite à la résolution spatiale des GCMs (généralement entre 60 et 300 km), ce qui nécessite de recourir à des techniques de paramétrisation. Ce procédé consiste à représenter statistiquement des phénomènes à petite échelle, comme la convection atmosphérique ou la formation des nuages. Or, ces approximations sont sources de fortes incertitudes, en particulier pour les précipitations, souvent mal simulées par les modèles. Stephens et al. (2010) qualifient même

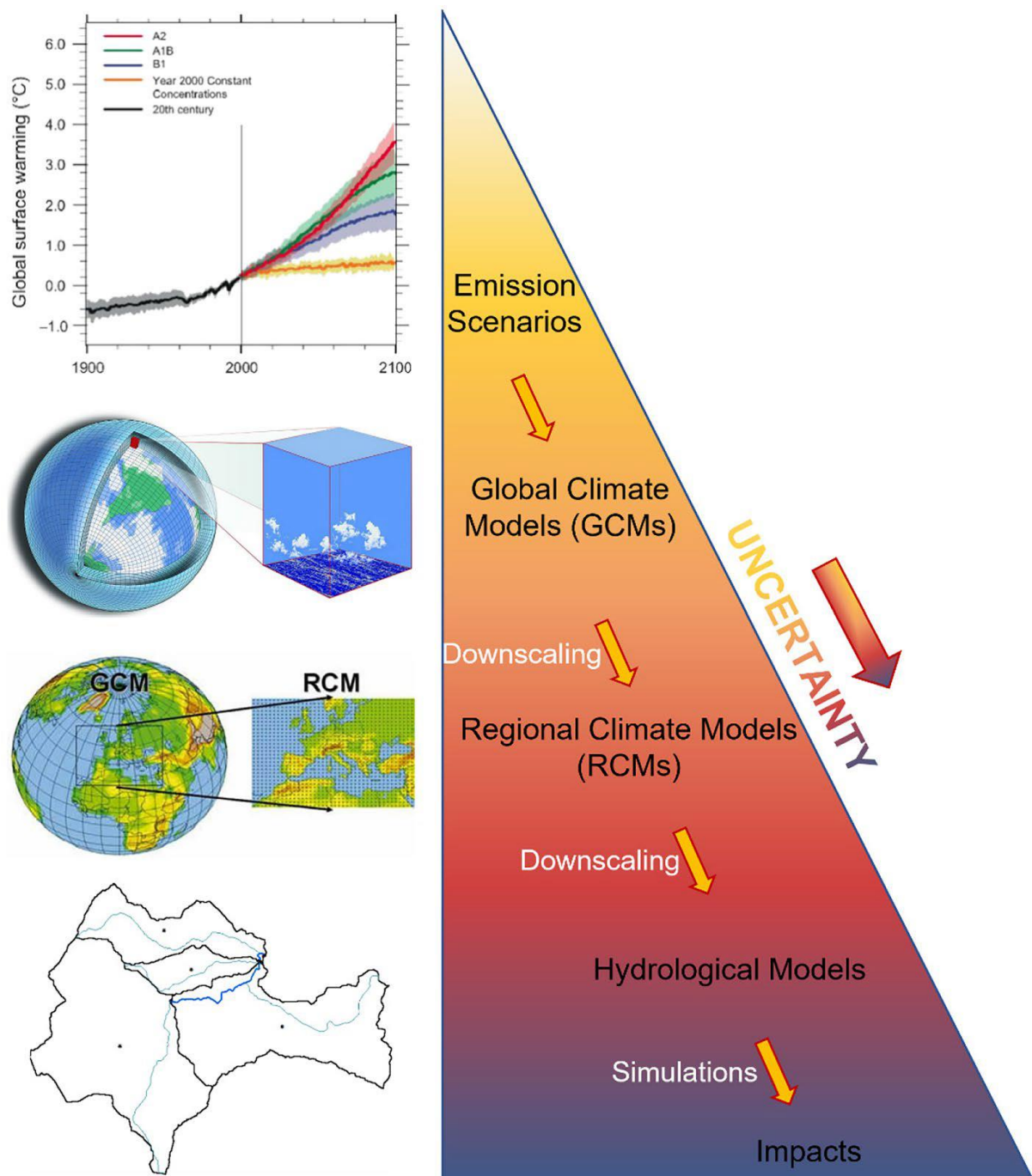


Figure 7. Représentation schématique des différentes sources d'incertitude dans les prévisions climatiques et les analyses d'impact (Noto et al., 2023)

La capacité des GCMs à représenter les précipitations de « catastrophique », et d'autres études confirment que la nature non linéaire et multi-échelle des processus impliqués rend leur modélisation très imprécise (Tapiador et al., 2019).

En plus des limitations liées à la paramétrisation, les GCMs présentent des incertitudes dans la simulation des rétroactions climatiques essentielles — telles que les interactions entre la vapeur

d'eau et le réchauffement, les effets des nuages sur le rayonnement, ou encore la circulation océanique. Ces rétroactions peuvent entraîner des réponses très divergentes d'un modèle à l'autre, même lorsqu'ils sont soumis au même scénario d'émissions.

Pour mieux évaluer l'incertitude issue des GCMs, il est courant d'utiliser des ensembles multi-modèles, comme ceux du projet CMIP (Wang et al., 2020). Ces ensembles permettent de capturer une gamme de réponses climatiques potentielles, mais ils impliquent des coûts de calcul importants. À l'inverse, réduire le nombre de modèles considérés peut certes limiter la charge computationnelle, mais cela peut aussi sous-estimer l'incertitude ou introduire un biais dans les projections (Tebaldi et Knutti, 2007).

Face à ces limites, de nouveaux modèles à haute résolution, comme les Convection-Permitting Models (CPMs), ont été développés. Par exemple, le UK Met Office a conçu un CPM capable de simuler des scénarios climatiques futurs pour le Royaume-Uni sous le RCP8.5, avec une résolution spatiale de 2,2 km et des sorties à l'échelle horaire ou journalière (Kendon et al., 2019). Cette finesse permet de mieux représenter les processus locaux — tels que la convection, les effets orographiques ou côtiers — qui ne peuvent être correctement simulés par les GCMs ou même les RCMs (modèles régionaux, typiquement entre 10 et 50 km de résolution) sans paramétrisation. Toutefois, malgré leur potentiel, les CPMs présentent encore plusieurs limitations techniques et scientifiques. Kendon et al. (2021) identifient notamment : (i) une tendance à surestimer l'intensité des précipitations intenses ; (ii) une représentation encore inadéquate des processus de surface et de leurs interactions avec l'atmosphère à l'échelle du kilomètre ; (iii) le manque d'intégration explicite des forçages océaniques latéraux, souvent négligés dans les CPMs, mais cruciaux dans certaines régions ; et (iv) des coûts computationnels élevés qui limitent la durée des simulations, la taille des domaines modélisés, et le nombre de membres d'ensemble réalisables.

En résumé, malgré les avancées notables dans le développement des modèles climatiques, l'incertitude structurelle inhérente à leur conception, en particulier en ce qui concerne les processus à fine échelle, demeure une contrainte majeure dans l'estimation fiable des impacts du changement climatique.

4.1.3. Incertitudes liées au downscaling des modèles climatiques

L'évaluation des impacts du changement climatique sur la gestion des ressources en eau — tels que le débit des rivières, l'humidité des sols ou encore la recharge des nappes phréatiques — nécessite souvent l'utilisation conjointe de modèles climatiques globaux (GCMs) et de modèles hydrologiques. Toutefois, cette démarche se heurte à une difficulté majeure : la disparité des échelles spatiales entre les GCMs, généralement conçus à l'échelle planétaire, et les modèles hydrologiques, souvent centrés sur des bassins versants ou des régions spécifiques (Buytaert et al., 2010). Or, de nombreux processus hydrologiques locaux dépendent de phénomènes physiques à petite échelle, nécessitant ainsi un changement d'échelle (downscaling) des projections climatiques fournies par les GCMs vers des échelles régionales ou locales (Joseph et al., 2018).

Cette étape de downscaling constitue une source supplémentaire d'incertitude dans la chaîne de modélisation, en s'ajoutant à celles déjà inhérentes aux GCMs eux-mêmes. Deux grandes approches sont généralement utilisées pour effectuer ce passage d'échelle : le downscaling statistique et le downscaling dynamique. Le premier repose sur l'établissement de relations statistiques entre les variables simulées par les GCMs et les variables climatiques locales (Chen et al., 2020 ; Smid et Costa, 2018). Ces méthodes font cependant l'hypothèse de la stationnarité de ces relations dans le temps, ce qui peut engendrer une mauvaise représentation des changements climatiques futurs (Cannon et al., 2015).

À l'inverse, le downscaling dynamique utilise des modèles climatiques régionaux (RCMs) pour simuler de manière plus cohérente les processus physiques à l'échelle locale, en prenant comme conditions aux limites les sorties des GCMs. Bien que cette méthode soit plus physiquement fondée, elle demeure très exigeante en termes de calcul, ce qui limite son application à certaines régions du globe. De plus, les méthodes statistiques comme dynamiques peuvent être affectées par les biais de circulation atmosphérique présents dans les GCMs, biais qui se répercutent dans les projections régionales, notamment sur des variables telles que la température ou les précipitations (Chokkavarapu et Mandla, 2019).

Pour réduire ces incertitudes, plusieurs chercheurs ont proposé d'utiliser des ensembles multi-modèles régionaux et des combinaisons de plusieurs projections issues de GCMs différents. Cette approche permet de générer des fonctions de distribution de probabilité des variables hydrologiques futures, ce qui fournit une représentation plus complète de l'éventail des résultats possibles.

Au cours de la dernière décennie, le downscaling a été identifié comme l'un des principaux contributeurs aux incertitudes dans les études d'impacts climatiques (Mandal et al., 2016). Toutefois, certaines limites méthodologiques ont été soulevées. D'une part, de nombreuses études se concentrent sur les variables d'impact utilisées en hydrologie ou en écologie, tout en supposant implicitement une relation linéaire entre ces variables et le climat, alors que cette relation est souvent hautement non linéaire. D'autre part, beaucoup de recherches sont menées à petite échelle spatiale, comme les bassins versants, ce qui rend difficile la généralisation des résultats à des régions plus vastes.

Certaines de ces limites peuvent être atténuées grâce à l'utilisation de modèles à haute résolution spatiale, comme les Convection-Permitting Models (CPMs), tels que ceux décrits précédemment dans le cadre du UK-CPM. Ces modèles sont capables de mieux capturer les processus atmosphériques locaux qui influencent fortement les schémas de variables climatiques telles que les précipitations ou la température, et offrent ainsi des projections climatiques plus détaillées à l'échelle locale.

4.2. Méthodes pour traiter les incertitudes

Face à la diversité des incertitudes affectant les projections climatiques, plusieurs approches méthodologiques ont été développées pour mieux les comprendre, les quantifier et les intégrer dans les processus de décision. Ces méthodes visent à améliorer la robustesse des résultats et à soutenir des politiques d'adaptation plus fiables.

4.2.1. Utilisation d'ensembles multi-modèles (multi-model ensembles)

L'une des approches les plus courantes consiste à utiliser un ensemble de modèles climatiques issus d'initiatives internationales telles que le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). Cette méthode permet de comparer les résultats de différents modèles et d'évaluer l'incertitude structurelle, c'est-à-dire celle qui découle des différences dans la formulation et la représentation des processus climatiques. L'analyse d'un ensemble multi-modèles permet également d'identifier les tendances robustes — c'est-à-dire les signaux du changement climatique qui sont cohérents à travers plusieurs modèles — tout en tenant compte de la dispersion des projections.

4.2.2. Simulations par ensembles (multi-réalisations)

Une autre technique consiste à effectuer plusieurs simulations avec un même modèle climatique, en faisant varier légèrement les conditions initiales. Cette méthode permet d'estimer l'incertitude interne liée à la variabilité naturelle du climat, qui peut avoir un impact significatif,

notamment à des échelles temporelles de quelques décennies. Ces simulations, souvent appelées ensembles de réalisations, aident à distinguer les variations dues au système climatique lui-même de celles qui résultent des scénarios d'émissions ou du choix des modèles.

4.2.3. Pondération et méthodes statistiques avancées

Pour affiner l'analyse des ensembles de modèles, des approches statistiques sont mises en œuvre afin de pondérer les modèles en fonction de leur performance ou de leur crédibilité. Parmi ces méthodes, on trouve la pondération bayésienne, qui attribue une probabilité à chaque modèle en fonction de sa capacité à reproduire les observations passées. D'autres approches plus récentes s'appuient sur les algorithmes d'apprentissage automatique, qui permettent de détecter les modèles les plus fiables pour certaines régions ou variables climatiques. Ces techniques contribuent à réduire les biais et à produire des projections probabilistes mieux calibrées.

4.3. Conséquences des incertitudes sur les décisions d'adaptation

L'existence d'incertitudes dans les projections climatiques ne doit pas être perçue comme un obstacle à l'action, mais plutôt comme un élément à intégrer de manière proactive dans les processus de planification. En effet, l'incertitude ne signifie ni ignorance, ni inaction, mais appelle à la mise en place de stratégies souples et adaptatives.

Des approches telles que la planification adaptative ou les analyses de robustesse permettent de concevoir des politiques efficaces dans un contexte d'incertitude. L'objectif est de privilégier des mesures « sans regret », c'est-à-dire des options d'adaptation qui apportent des bénéfices quel que soit le scénario climatique futur retenu. Ces stratégies visent à augmenter la résilience des systèmes socio-écologiques face à une gamme étendue de possibles, tout en gardant la capacité de réviser les actions au fil du temps en fonction des nouvelles données disponibles.

Les incertitudes associées aux projections climatiques sont incontournables, mais elles ne doivent pas être un frein à l'action climatique. Bien au contraire, elles soulignent la nécessité d'adopter une approche scientifiquement rigoureuse, transparente et flexible dans l'évaluation des impacts et dans l'élaboration des stratégies d'adaptation. En mobilisant des outils comme les ensembles multi-modèles, les simulations par réalisations multiples et les techniques statistiques avancées, il est possible de caractériser et encadrer ces incertitudes de manière efficace.

Il est essentiel de rappeler que ces incertitudes ne remettent pas en cause la réalité du changement climatique, ni l'urgence d'agir. Elles imposent simplement une plus grande

prudence dans l'interprétation des résultats et appellent à une gouvernance climatique fondée sur la robustesse, la précaution et la transparence. Enfin, une communication claire des incertitudes renforce la crédibilité scientifique et contribue à instaurer la confiance du public dans les décisions prises face au défi climatique.

Chapitre 4 : Évolution du climat et impacts sur la ressource en eau

1. Introduction

Le changement climatique constitue l'un des défis majeurs du XXI^e siècle, affectant de manière significative les systèmes agricoles à l'échelle mondiale (Yuan et al. 2024). Les altérations des régimes climatiques, notamment l'augmentation des températures et la variabilité accrue des précipitations, ont des répercussions directes sur la disponibilité des ressources en eau et, par conséquent, sur les besoins hydriques des cultures agricoles. Cette problématique est particulièrement aiguë dans les régions arides et semi-arides, telles que l'Afrique du Nord, où l'Algérie fait face à des défis croissants en matière de gestion de l'eau agricole.

Les projections climatiques indiquent une augmentation continue des températures moyennes mondiales, accompagnée d'une intensification des événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses et les vagues de chaleur. Ces changements affectent la croissance des cultures, modifient les cycles phénologiques et augmentent l'évapotranspiration, entraînant une hausse des besoins en eau pour maintenir les rendements agricoles.

Par ailleurs, la variabilité des précipitations compromet la disponibilité en eau pour l'irrigation, rendant les systèmes agricoles plus vulnérables aux pénuries hydriques. Cette situation est exacerbée dans les zones dépendantes de l'agriculture pluviale, où l'irrigation est limitée ou inexistante.

2. Tendances climatiques globales

Le changement climatique, principalement induit par l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES), modifie de manière significative les paramètres climatiques à l'échelle mondiale. Selon le sixième rapport du GIEC (IPCC, 2021), la température moyenne de la planète a augmenté d'environ 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle, avec une accélération notable depuis les années 1980. Cette évolution s'accompagne d'un dérèglement profond du cycle hydrologique : certaines régions connaissent une hausse de la fréquence et de l'intensité des précipitations, tandis que d'autres subissent des épisodes de sécheresse plus longs et plus sévères.

Parallèlement, l'augmentation des températures entraîne une évapotranspiration accrue, réduisant l'humidité des sols et affectant la disponibilité en eau douce, notamment pour les usages agricoles. Le Programme mondial d'évaluation des ressources en eau (WWAP, 2020) souligne que les régions agricoles irriguées subiront, dans les prochaines décennies, une pression croissante en matière de gestion de l'eau, en particulier dans les zones déjà arides ou semi-arides.

3. Impacts sur la disponibilité des ressources en eau

Les modifications du climat influencent l'ensemble des composantes du cycle de l'eau : précipitations, ruissellement, infiltration, recharge des nappes phréatiques, et débit des cours d'eau. Plusieurs études montrent que le changement climatique peut induire :

- une réduction du volume des précipitations annuelles, ou une redistribution temporelle défavorable (pluies plus concentrées et intenses sur de courtes périodes) ;
- une augmentation des pertes en eau par évaporation des plans d'eau et des sols ;
- une diminution de la recharge des aquifères, en raison de la baisse de l'infiltration et de la surexploitation des nappes ;
- une modification de la saisonnalité des écoulements fluviaux, avec des crues plus précoces et des étiages plus marqués.

Ces phénomènes entraînent une raréfaction de l'eau disponible pour l'agriculture, particulièrement dans les zones dépendantes de l'irrigation. D'après Döll et Schmied (2012), près de 20 % des terres irriguées mondiales connaîtront une baisse significative de disponibilité en eau à l'horizon 2050, en l'absence de mesures d'adaptation.

4. Enjeux hydriques en Afrique du Nord

L'Afrique du Nord est l'une des régions les plus exposées aux impacts du changement climatique sur l'agriculture. Les pays de cette région, y compris l'Algérie, connaissent une augmentation des températures et une diminution des précipitations depuis les années 1970. Ces tendances climatiques entraînent une réduction de la disponibilité en eau et une augmentation des besoins en irrigation pour compenser les déficits hydriques.

En Algérie, l'agriculture représente une part importante de l'économie et de l'emploi, mais elle est confrontée à des défis majeurs liés à la gestion de l'eau. Les ressources en eau sont limitées,

avec une répartition géographique inégale, et les infrastructures d'irrigation sont souvent obsolètes ou insuffisantes. La surexploitation des nappes phréatiques et la faible efficacité des systèmes d'irrigation aggravent la situation, rendant l'agriculture algérienne particulièrement vulnérable aux changements climatiques.

4.1. Spécificités de la région nord-africaine

L'Afrique du Nord constitue l'une des régions les plus vulnérables aux effets du changement climatique sur les ressources en eau. Cette vulnérabilité s'explique par plusieurs facteurs climatiques caractéristiques de la zone, notamment une pluviométrie globalement faible, oscillant entre 100 et 600 mm par an selon les régions, une forte variabilité interannuelle des précipitations, ainsi qu'une prédominance de régimes climatiques arides à semi-arides. Ces derniers sont particulièrement sensibles aux moindres fluctuations climatiques, rendant les écosystèmes et les activités humaines fortement dépendants de conditions hydriques déjà précaires (Majdi et al., 2022).

Selon une étude de MedECC (2020), la température moyenne dans la région méditerranéenne a augmenté de 1,5 °C, soit un rythme supérieur à la moyenne mondiale. Le scénario RCP 8.5 prévoit une hausse de température pouvant atteindre +4 °C d'ici 2100, avec une réduction de 10 à 30 % des précipitations annuelles dans certaines zones du Maghreb (Cramer et al., 2020).

Ces évolutions affectent directement les ressources en eau disponibles, notamment les barrages, les oueds et les nappes phréatiques qui alimentent les systèmes d'irrigation. En parallèle, la demande en eau augmente en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation et de la diversification des cultures agricoles.

4.2. Situation et défis spécifiques de l'Algérie

En Algérie, les effets du changement climatique sur les ressources en eau sont déjà visibles. Le pays enregistre une réduction de la pluviométrie moyenne annuelle estimée à 20 % depuis les années 1970 (ONM, 2021). Cette tendance est particulièrement marquée dans l'ouest et les Hauts Plateaux, où la fréquence des années sèches augmente. Le stress hydrique est aggravé par la surexploitation des nappes, dont le niveau baisse significativement dans des zones comme la Mitidja ou le Sahara septentrional.

Par ailleurs, l'agriculture algérienne repose en grande partie sur des systèmes irrigués peu efficaces (rendement des réseaux < 60 %), ce qui accentue la pression sur les ressources. L'irrigation mobilise environ 64 % des ressources en eau du pays, mais la disponibilité annuelle

en eau par habitant est passée en dessous du seuil critique de 500 m³/an (FAO, AQUASTAT, 2020), classant l'Algérie parmi les pays en situation de pénurie hydrique sévère.

Les modèles climatiques appliqués au contexte algérien (Bouregaa et Chetoui, 2025) montrent que les besoins en irrigation pourraient augmenter de 15 à 25 % à l'horizon 2050, notamment pour les cultures sensibles comme les céréales, les agrumes et les cultures maraîchères. Cette évolution impose une reconsidération des politiques d'aménagement agricole et des pratiques de gestion de l'eau.

Chapitre 5 : Les céréales en contexte de changement climatique

1. Introduction

Les céréales, notamment le blé, le riz, le maïs, l'orge, l'avoine, le seigle, le sorgho et le millet, occupent une place centrale dans les systèmes agricoles et alimentaires mondiaux. Cultivées sur près de 700 millions d'hectares, elles constituent la base de la sécurité alimentaire planétaire, en fournissant environ 50 % des calories et 40 % des protéines consommées par l'humanité. Trois espèces dominent largement la production mondiale : le maïs (environ 1,1 milliard de tonnes), le riz (520 millions de tonnes) et le blé (770 millions de tonnes), (FAO, 2024).

La domestication de ces céréales, amorcée au Néolithique il y a environ 10 000 ans, a été un tournant majeur dans l'histoire humaine, en permettant la sédentarisation des populations et l'émergence des premières grandes civilisations : le riz en Asie, le blé dans le bassin méditerranéen et le Proche-Orient, et le maïs en Amérique centrale. Aujourd'hui, selon la FAO, environ 40 % de la production céréalière mondiale est destinée à l'alimentation humaine, 50 % à l'alimentation animale, le reste étant utilisé dans l'industrie.

En Algérie, la culture céréalière constitue la principale filière agricole du pays. Sur environ 6 millions d'hectares potentiellement cultivables, entre 3 et 3,5 millions d'hectares sont emblavés chaque année, le reste étant maintenu en jachère. Le blé, principalement le blé dur (environ 70 % des emblavures), ainsi que l'orge, dominent cette production. Toutefois, les rendements demeurent relativement faibles, avec une moyenne nationale estimée à 13,5 quintaux par hectare pour le blé (Bessaoud, et al., 2019).

Les céréales représentent une composante essentielle de la ration alimentaire des Algériens, fournissant près de 60 % des calories et entre 75 et 80 % des protéines consommées. La consommation apparente s'élève à environ 219 kg par habitant et par an, un chiffre comparable à celui des pays voisins (240 kg au Maroc, 205 kg en Tunisie) (Djermoun, 2009).

Sur le plan spatial, les Hauts-Plateaux orientaux et occidentaux concentrent plus de 70 % de la production céréalière nationale, notamment dans les wilayas de Sétif, Tiaret, Sidi Bel-Abbès et El-Eulma . Ces zones, situées entre 900 et 1 200 m d'altitude, sont caractérisées par un climat semi-aride, une pluviométrie annuelle moyenne de 300 à 400 mm, et une variabilité interannuelle élevée, avec des épisodes de sécheresse printanière et de gel tardif qui peuvent réduire les rendements de 20 à 30 % en une saison (Djekoun et al., 2002). Cette instabilité climatique se traduit par une forte volatilité de la production nationale, avec des écarts pouvant atteindre un facteur 1 à 5 entre les années déficitaires et excédentaires. Ainsi, entre 2021 et 2022, la production est passée de 27,6 millions de quintaux à 41 millions, soit une hausse de 48 % en un an, principalement attribuée à des conditions pluviométriques plus favorables et à des politiques publiques de soutien (MADR, 2023).

Au-delà de leur fonction alimentaire, les céréales jouent un rôle structurant dans l'économie rurale et agro-industrielle. Elles alimentent les filières de transformation (minoteries, semouleries, boulangeries) et représentent un levier central des politiques de souveraineté alimentaire. Toutefois, la dépendance aux importations demeure élevée : durant la campagne 2023/2024, l'Algérie a importé 9,2 millions de tonnes de blé, soit 60 % des importations céréalières totales, et 4 millions de tonnes de maïs, principalement destiné à l'aviculture (FAO, 2024). Cette dépendance, aggravée par la volatilité des prix mondiaux et les tensions géopolitiques, renforce l'urgence d'une stratégie de souveraineté céréalière fondée sur l'intensification durable, la diversification des zones de production et la maîtrise des ressources en eau.

2. Cycle biologique et sensibilité climatique du blé

Le cycle de croissance du blé regroupe l'ensemble des transformations phénologiques que la plante connaît au cours de son développement. L'émergence des différents stades phénologiques est principalement régie par les températures effectives cumulées ainsi que par la photopériode depuis la phase de germination (Boufenar et Zaghoulane, 2006). Classiquement, le développement du blé se structure en trois grandes phases distinctes :

- La phase végétative,
- La phase reproductive,
- La phase de formation et de maturation du grain.

2.1. Les stades phénologiques

2.1.1. La phase végétative

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

2.1.1.1. Stade de germination

Lors de la germination, les racines séminales se développent en premier, suivies du coléoptile, structure protectrice qui facilite l'émergence de la première feuille. La longueur du coléoptile constitue un facteur limitant de la profondeur de semis : elle est fortement dépendante du génotype et n'augmente que marginalement lorsque la graine est enfouie plus profondément (Richard et al., 2015).

Pour que la germination s'effectue dans des conditions optimales, deux exigences fondamentales doivent être satisfaites :

- La graine doit être viable, c'est-à-dire vivante et physiologiquement mature ;
- Le sol doit fournir l'eau, l'oxygène et une température appropriée.

La taille des graines n'influence pas directement le taux de germination, mais elle affecte significativement la croissance des plantules, le développement ultérieur de la culture et le rendement final. Les graines de grande taille favorisent une levée plus vigoureuse, un plus grand nombre de talles fertiles par plante et une productivité accrue en grains ; cet avantage est particulièrement marqué en conditions de stress hydrique (Ambika et al., 2014).

2.1.1.2. Stade levée-tallage

Boufenar et Zaghoulane (2006) décrivent la phase végétative comme suit : dès l'émergence de la première feuille à travers le coléoptile, ce dernier cesse sa croissance et entre en dessiccation, marquant le stade de la levée. Par la suite, les feuilles se développent de manière séquentielle jusqu'à la quatrième, en disposition alterne. L'apparition de la première tige latérale, à l'aisselle de la première feuille de la tige principale, signale l'entrée dans le stade de début de tallage. Ce processus se caractérise par l'activation des bourgeons axillaires, entraînant une production synchrone de talles. La zone de développement de ces talles est connue sous le nom de « plateau de tallage ».

L'aptitude d'un génotype à émettre des talles constitue une caractéristique variétale, bien que fortement influencée par les conditions environnementales, telles que la température, la disponibilité en eau et en azote, ainsi que les pratiques culturales. Selon Andersson (2005), une carence en azote entraîne simultanément l'arrêt du tallage et une réduction de la croissance des talles déjà formées.

Cependant, toutes les talles ne sont pas nécessairement productives : nombre d'entre elles avortent avant la phase d'anthèse. Le nombre final de talles fertiles est le résultat d'interactions complexes entre le génotype, les conditions environnementales et la densité de semis. Sur le plan agronomique, le tallage joue un rôle fondamental en permettant à la culture de compenser un déficit de peuplement initial ou les pertes dues à des stress précoces, tels que les gelées.

La durée de la phase végétative chez le blé est variable, pouvant s'étendre de 60 à 150 jours selon la date de semis et le génotype. Elle dépend notamment du rythme d'apparition des feuilles, souvent exprimé par la phyllochronie, définie comme l'intervalle de temps entre l'émergence de deux feuilles successives sur la tige principale, et du moment de la différenciation florale, marqué par le stade de la double crête. Ces processus sont régulés par la photopériode (rapport jour/nuit) et la vernalisation (exposition au froid nécessaire à l'induction florale) (Acevedo et al., 2009).

2.1.2. La phase reproductrice

La phase reproductive débute lorsque l'on peut observer une jeune inflorescence (apex floral) d'environ 1 cm au-dessus du plateau de tallage. Cette période de développement peut être subdivisée en deux grands stades : la montaison-gonflement et l'épiaison-floraison (Boufenar et Zaghoulane, 2006).

2.1.2.1. Stade de montaison et gonflement

Le stade de montaison se caractérise par la différenciation et l'allongement progressif des ébauches de nœuds et d'entre-nœuds. Cette phase est marquée par une augmentation notable des besoins physiologiques de la plante, notamment en eau, en lumière et en azote. Sa durée est relativement stable, estimée entre 28 et 30 jours (Lancashire et al., 1995).

Au cours de cette période, les pièces florales commencent à se différencier : d'abord les glumelles (inférieures puis supérieures), suivies des organes sexuels (étamines et stigmates). En parallèle, la tige s'allonge, tout comme l'inflorescence, qui gagne progressivement en hauteur. Les apex des talles évoluent de simples ébauches d'épillets à des structures florales différenciées, amorçant leur montée vers le sommet, c'est le stade de tallage en épis.

Les besoins en azote deviennent particulièrement critiques à partir de cette étape, car ils conditionnent le nombre d'épis formés, le nombre de grains par épi, ainsi que le poids final des grains (Lancashire et al., 1995). L'allongement de la dernière feuille entraîne une expansion de sa gaine, qui finit par se gonfler sous la pression de l'épi en croissance : ce phénomène marque le stade de gonflement.

2.1.2.2. Stade d'épiaison et floraison

Peu de temps après le gonflement de la gaine foliaire, l'épi émerge à l'extrémité de chaque tige. À l'intérieur de l'épi, les épillets se différencient progressivement, et les fleurs apparaissent. La précocité d'épiaison constitue un caractère agronomique recherché, notamment en zones semi-arides, car elle permet d'échapper aux sécheresses de fin de cycle (Boufenar et Zaghoulane, 2006). La durée de l'épiaison peut varier : elle est généralement brève, mais peut être prolongée en cas de températures basses.

Un stress hydrique survenant durant cette période compromet fortement la croissance des épis, réduisant ainsi le nombre de grains produits. L'épi de blé est constitué de deux rangées d'épillets disposés de part et d'autre de l'axe central. Chaque épillet regroupe en moyenne trois fleurs, protégées par deux glumes. Chaque fleur, dépourvue de pétales, est entourée de deux glumelles, et renferme trois étamines (organes mâles) ainsi qu'un ovaire coiffé de deux styles plumeux (organes femelles).

La fleur de blé est majoritairement cléistogame, c'est-à-dire que la libération du pollen se produit généralement avant même que les étamines ne sortent de la fleur. Ce pollen peut alors directement atteindre le stigmate, permettant la fécondation. À l'issue de ce processus, plusieurs grains se développent à l'intérieur de chaque épillet, enveloppés dans les glumelles (Kirby, 2002).

Toutefois, un déficit hydrique au moment de la floraison peut entraîner l'avortement des épillets, perturber le remplissage des grains et engendrer des phénomènes d'échaudage, altérant significativement le rendement (Chadouli et Djane-Hamed, 2015).

2.1.3. La phase de formation et de maturation du grain

La phase de formation et de maturation des grains se caractérise par deux processus essentiels : la multiplication cellulaire initiale, suivie par l'accumulation progressive des réserves principalement l'amidon et les protéines dans les cellules du grain. Cette phase est déterminante pour la formation du rendement, notamment le poids de mille grains (PMG) et la teneur en protéines du grain.

Les assimilats nécessaires à cette accumulation proviennent de la photosynthèse active durant cette période, mais également de la remobilisation des réserves transitoirement stockées dans les tiges et les racines au cours des phases précédentes. Selon Lindsey et al. (2017) le remplissage du grain suit une succession de stades physiologiques distincts :

- **Stade laiteux** : Le grain atteint ses dimensions définitives. Il est de couleur jaune pâle, et son contenu est encore liquide, d'aspect laiteux. Cette phase marque le début effectif du remplissage.
- **Stade pâteux** : Le grain conserve sa couleur jaune pâle mais présente une consistance pâteuse. Il s'écrase facilement entre les doigts. Son taux d'humidité se situe entre 50 et 60 %. La matière sèche de la plante avoisine 25 %, tandis que les feuilles et les spathes restent encore verts.
- **Stade pâteux-dur** : Le grain prend une coloration jaune plus soutenue et commence à se durcir, bien qu'il puisse encore être rayé à l'ongle. Son humidité est alors comprise entre 45 et 50 %. La teneur en matière sèche de la plante atteint environ 30 %. Les feuilles basales et les spathes amorcent leur dessèchement.
- **Stade vitreux** : Le grain devient dur et ne peut plus être entaillé à l'ongle. Son humidité passe sous la barre des 40 %. La matière sèche de la plante excède 35 %. Les feuilles situées sous l'épi ainsi que les spathes sont entièrement desséchées.
- **Maturité complète** : Ce stade marque la fin du cycle de développement du grain. L'humidité des grains chute en dessous de 35 %, tandis que la teneur en matière sèche de la plante entière dépasse 45 %. La plante est alors totalement sèche et prête pour la récolte.

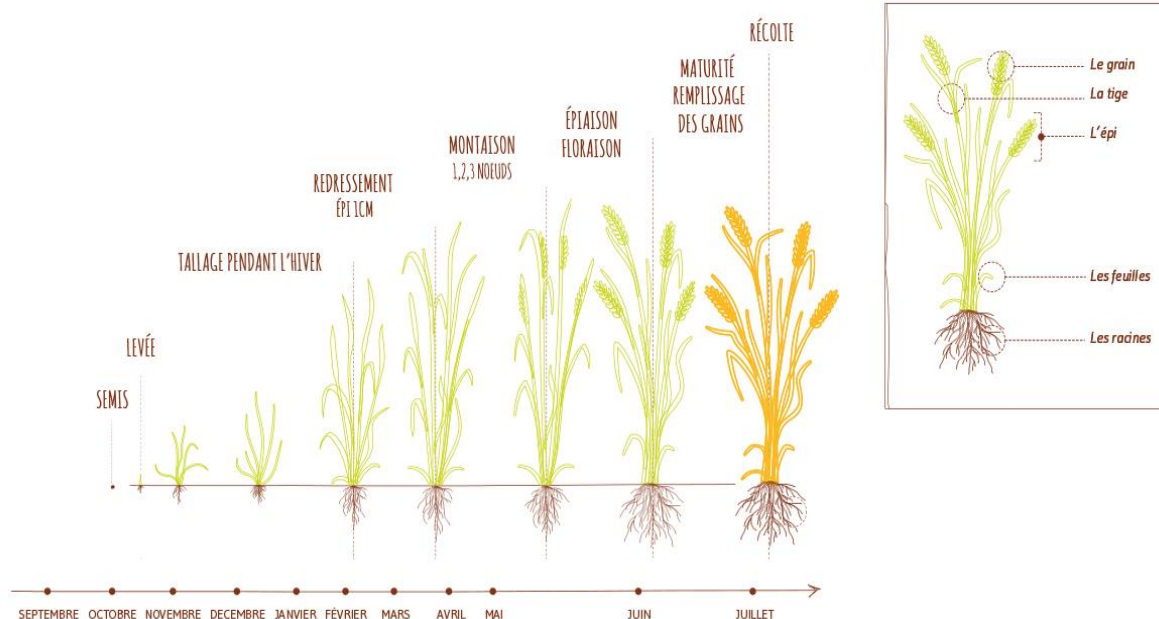


Figure 8. Les stades phénologique du blé

3. Répartition des zones de production céréalière en Algérie

En Algérie, la culture des céréales s'étend sur un territoire vaste et hétérogène, comprenant des plaines, des hauts plateaux ainsi que des chaînes montagneuses. Ce territoire se caractérise par une variabilité climatique marquée, allant du subhumide à l'aride supérieur, avec une prédominance notable dans la bande pluviométrique recevant entre 300 et 400 mm de précipitations annuelles (Feliachi, 2000 ; Cadi, 2005). Sur la base des conditions pédoclimatiques, il est possible de distinguer quatre grandes zones agroécologiques de production céréalière.

- **Zone potentielle** : Cette zone couvre principalement les plaines littorales et sublittorales ainsi que le nord des hauts plateaux. Elle bénéficie d'un cumul pluviométrique annuel compris entre 450 et 800 mm. La céréaliculture y est intensivement pratiquée, avec des superficies cultivées estimées entre 1 et 1,2 million d'hectares (Cadi et al., 2000).
- **Zone intermédiaire** : Localisée au sud des hauts plateaux, cette zone reçoit un cumul pluviométrique inférieur à 400 mm par an. Elle correspond à une région à vocation agropastorale, où la culture des céréales est pratiquée de manière extensive, avec des rendements généralement faibles. La superficie concernée est évaluée à environ 1,8 million d'hectares.

- **Zone steppique** : Caractérisée par un hiver rigoureux et une pluviométrie faible (200 à 300 mm), cette zone présente une forte variabilité interannuelle des précipitations. La céréaliculture y est irrégulière, et la superficie cultivée varie entre 0,3 et 0,8 million d'hectares selon les années. La production céréalière dans cette région est principalement axée sur l'orge, en raison de sa meilleure tolérance aux conditions climatiques difficiles.
- **Zone sud** : Dans cette région, la céréaliculture est exclusivement pratiquée sous irrigation, en raison des conditions climatiques extrêmement arides.

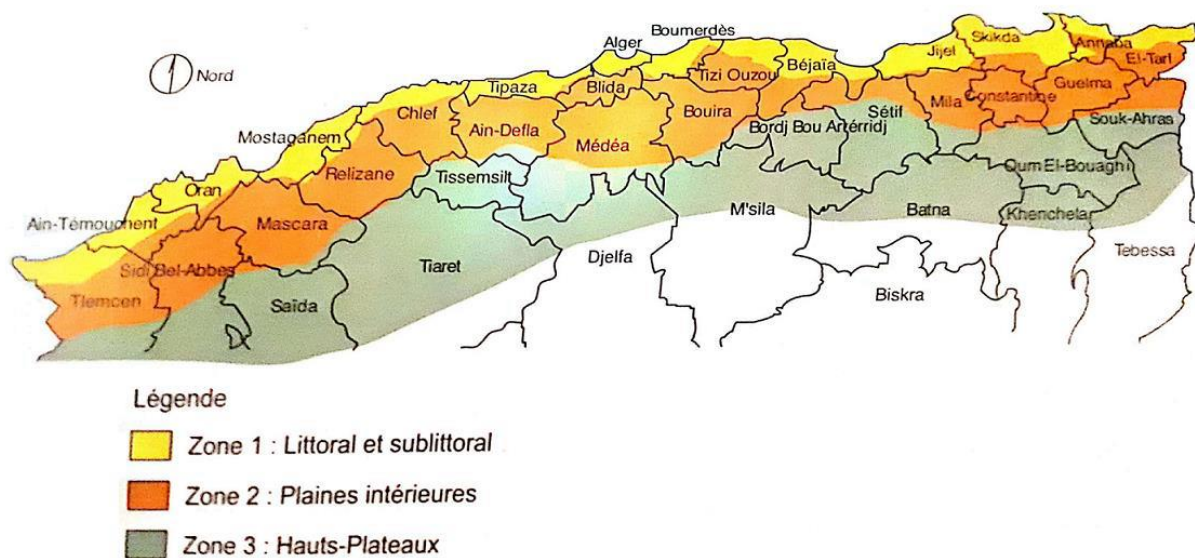


Figure 9. Les zones potentielles de production de culture pluviale blé dans le Nord de l'Algérie (Source : Cadi et al., 2000).

4. Effets du changement climatique sur les stades phénologiques du blé

Le changement climatique, notamment à travers l'élévation des températures moyennes et la modification des régimes pluviométriques, affecte profondément le développement du blé, culture emblématique des systèmes alimentaires mondiaux et pilier stratégique de la sécurité alimentaire en Afrique du Nord. Chaque stade de son cycle phénologique, de la levée à la maturité, est étroitement régulé par des seuils climatiques spécifiques : températures, photopériode, et disponibilité hydrique. Or, ces repères sont de plus en plus perturbés, en

particulier dans les régions méditerranéennes, où le réchauffement climatique est déjà manifeste (Mokhtari et al 2025 ; Bouregaa et al., 2025).

Les travaux de modélisation réalisés par Chourghal et Hartani (2020), fondés notamment sur le scénario médian A1B SRES à l'horizon 2071–2100, convergent vers un constat clair : le cycle du blé tend à s'accélérer sous l'effet du réchauffement. La floraison survient deux à cinq semaines plus tôt, la phase végétative se raccourcit parfois de près d'un mois, et la date de semis pourrait être avancée d'environ 37 jours (du 26 novembre au 20 octobre), tandis que la récolte interviendrait 52 jours plus tôt (du 28 juin au 7 mai). Selon les stratégies de conduite (semis dynamique ou prescrit), la durée totale du cycle pourrait ainsi être réduite de 15 à 31 jours.

Ces transformations ne sont pas anodines. Elles redessinent profondément les fenêtres de stress hydrique et thermique, modifient les dynamiques de croissance foliaire et les processus de remplissage des grains, et impactent in fine la taille, la qualité et la stabilité du rendement. À l'échelle agronomique, ces décalages appellent à une révision des pratiques : réorganisation des calendriers de semis, sélection de variétés précoces ou tolérantes, ajustement de la fertilisation et de l'irrigation. La présente synthèse se propose d'examiner, étape par étape, les effets actuellement observés et projetés du changement climatique sur les stades phénologiques du blé, en s'appuyant sur les résultats issus des expérimentations agronomiques et des scénarios climatiques les plus récents (Ebrahimi et al., 2025 ; Chourghal et Hartani 2020 ; Hu, J. et al., 2025)

4.1. Avancement du cycle phénologique et réduction de sa durée

Dans les conditions climatiques futures simulées, on observe un net avancement des stades clés du développement du blé. Ainsi :

La date de semis pourrait être avancée de 37 jours, passant du 26 novembre au 20 octobre.

La date de récolte s'en trouverait également avancée de 52 jours, du 28 juin au 7 mai.

Le cycle cultural global serait raccourci de 15 à 31 jours, selon la stratégie de semis adoptée.

4.2. Phase végétative considérablement écourtée

La phase végétative, essentielle pour la mise en place du couvert végétal et la formation de la biomasse, subit une réduction marquée :

Durée moyenne actuelle : 107 jours.

Durée moyenne projetée : 50 jours.

Le semis plus précoce, combiné à une élévation des températures (environ +3,7 °C en septembre-octobre), provoque un décalage vers l'automne du début du tallage et de la montaison. Cette accélération du développement végétatif limite la croissance foliaire et la surface foliaire maximale, avec pour conséquence une réduction de la photosynthèse cumulée.

4.3. Phase reproductive : stabilité ou allongement selon la stratégie de semis

La réponse de la phase reproductive au changement climatique dépend fortement du mode de gestion du semis :

Semis dynamique (date ajustée selon le retour des pluies) : allongement de 41 jours de la phase reproductive (149 jours contre 108 actuellement). Cette prolongation peut permettre un meilleur remplissage des grains, à condition que la culture échappe aux stress hydriques de fin de cycle.

Semis prescrit (date fixe, 1er novembre) : la durée de la phase reproductive reste quasiment stable, mais le stress hydrique plus intense en fin de saison compromet fortement le rendement.

4.4. Impacts agronomiques majeurs

Les modifications du cycle du blé sous climat futur ont plusieurs implications pratiques :

L'allongement de la phase reproductive peut être favorable, sous réserve d'une disponibilité hydrique suffisante (ce qui peut être obtenu par un semis précoce et le choix de variétés tolérantes).

Le raccourcissement de la phase végétative constitue un risque, car il peut engendrer une production de biomasse insuffisante, sauf si des pratiques telles que l'augmentation de la densité de semis ou une fertilisation azotée adaptée sont mises en place.

Les stades critiques (montaison, floraison, début du remplissage) connaissent un décalage saisonnier : la floraison, par exemple, pourrait intervenir en avril au lieu de mai-juin. Si cela peut réduire l'exposition aux vagues de chaleur tardives, cela accroît en revanche le risque de gelées printanières.

Face à ces changements, plusieurs leviers d'adaptation sont identifiés :

Sélectionner des variétés précoces, capables d'aligner leur cycle sur la nouvelle fenêtre hydrique optimale. Privilégier le semis dynamique, déclenché dès que 20 mm de pluie cumulés sont enregistrés sur 5 jours consécutifs, plutôt qu'une date fixe. Adapter les intrants (fertilisation, irrigation) pour compenser la réduction de la phase végétative et soutenir la phase reproductive, qui devient de plus en plus déterminante pour le rendement.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Chapitre 6 : Matériel et Méthodes

1. Introduction

Le Nord de l'Algérie, situé entre la mer Méditerranée et les chaînes montagneuses de l'Atlas tellien, constitue une zone stratégique sur les plans socio-économique et environnemental. Cette région, qui s'étend sur environ 12 % de la superficie nationale, concentre la majeure partie de la population, des terres agricoles fertiles et des ressources hydriques exploitables. Les caractéristiques physiques et géographiques de cette zone, marquées par une topographie contrastée et une proximité avec le littoral, influencent fortement les dynamiques agroclimatiques et les modes d'occupation du sol.

Le contexte agroclimatique du Nord algérien se distingue par une alternance entre saisons humides et sèches, typique du climat méditerranéen, mais modulée par des spécificités locales telles que l'exposition, l'altitude et la distance à la mer. Cette combinaison de facteurs crée une grande diversité de microclimats, allant des plaines littorales relativement douces aux zones montagneuses plus froides et arrosées. Cependant, cette variabilité spatio-temporelle du climat se traduit également par des irrégularités interannuelles, souvent accentuées par le changement climatique, entraînant des épisodes extrêmes de sécheresse ou de pluies intenses.

Sur le plan agricole, le potentiel de production est considérable grâce à la qualité des sols, la disponibilité relative en eau dans certaines zones et la diversité des cultures adaptées. Néanmoins, des contraintes persistantes limitent l'exploitation optimale de ce potentiel : déficit hydrique en période estivale, pression démographique sur les terres, fragmentation foncière et vulnérabilité face aux aléas climatiques. Ces enjeux rendent indispensable la mise en œuvre de stratégies de gestion intégrée de l'eau et d'optimisation des cultures.

Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les besoins hydriques des cultures, il est nécessaire de recourir à des méthodes robustes de projection climatique et d'estimation agronomique. La procédure adoptée dans ce travail repose sur l'utilisation de données climatiques observées et simulées, intégrant des projections issues du modèle climatique

CMCC-ESM2, reconnu pour ses performances dans la simulation des variables agroclimatiques à différentes échelles temporelles. Ces données servent de base à la modélisation des besoins en eau via le logiciel CROPWAT, développé par la FAO, qui permet de calculer l'évapotranspiration de référence, les besoins en eau des cultures (CWR) et les calendriers d'irrigation optimisés.

La description détaillée du modèle CROPWAT inclut ses paramètres d'entrée (données météorologiques, types de sol, stades phénologiques) et ses principes de calcul basés sur la méthode de Penman-Monteith. Quant au modèle climatique CMCC-ESM2, il s'appuie sur une architecture intégrée couplant océan, atmosphère et surface terrestre, offrant ainsi des simulations réalistes des conditions climatiques futures. L'articulation de ces deux approches permet de déterminer avec précision l'évolution spatio-temporelle des besoins en eau des cultures dans le Nord algérien, et d'anticiper les stratégies d'adaptation nécessaires pour garantir la sécurité alimentaire dans un contexte de changement climatique.

Dans ce chapitre, est présenté l'ensemble du cadre géographique, climatique et méthodologique lié à l'étude menée dans le Nord de l'Algérie. Ce chapitre débute par une description de la zone d'étude, comprenant sa localisation, ses caractéristiques physiques et géographiques, ainsi que les particularités agroclimatiques qui la distinguent, notamment la variabilité spatio-temporelle du climat et les contraintes agricoles rencontrées (Figure 10).

Ensuite, sont présentées les sources des données climatiques observées et projetées, ainsi que les méthodes retenues pour leur traitement. Les projections climatiques sont issues du modèle CMCC-ESM2, reconnu pour sa capacité à simuler les variables agroclimatiques à différentes échelles temporelles.

Par la suite, est détaillée la procédure de modélisation des besoins en eau des cultures (CWR) à l'aide du logiciel CROPWAT développé par la FAO. Une description du fonctionnement du modèle, de ses paramètres d'entrée (données météorologiques, types de sol, stades phénologiques) et de ses principes de calcul basés sur la méthode de Penman-Monteith est également présentée.

Enfin, ce chapitre se termine par l'articulation entre les données climatiques issues du CMCC-ESM2 et les simulations CROPWAT, permettant d'évaluer avec précision l'évolution spatio-temporelle des besoins en eau des cultures dans le Nord algérien et d'identifier les stratégies d'adaptation envisageables face au changement climatique.

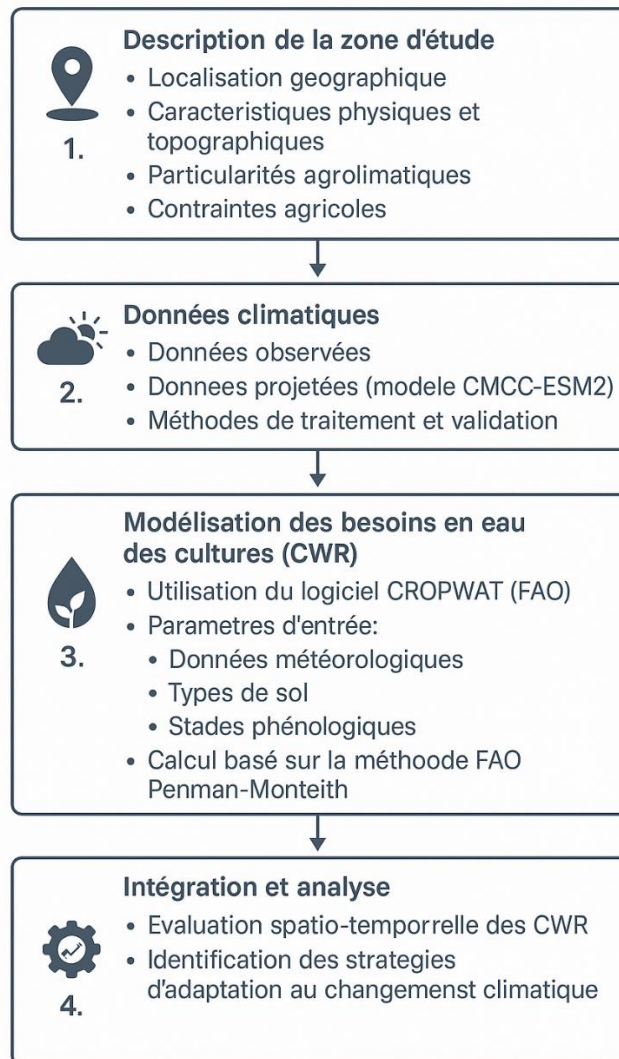


Figure 10. Méthodologie d'évaluation des besoins en eau des cultures face au changement climatique

2. La Zone d'étude

2.1. Caractéristiques de la Zone d'Étude

La zone d'étude couvre l'ensemble de la région septentrionale de l'Algérie (Figure 11), s'étendant entre les longitudes 2°20'O et 8°70'E et les latitudes 33°90'N et 37°15'N. Cette vaste étendue géographique, d'une superficie totale de 193 626 km², représente un territoire d'une importance stratégique tant sur le plan climatique qu'agroécologique. Délimitée par la mer Méditerranée au nord, le Maroc à l'ouest, la Tunisie à l'est et le Grand Sahara au sud, elle constitue une interface climatique et environnementale majeure, marquée par une transition progressive entre des influences méditerranéennes et sahariennes.

Cette région joue un rôle clé dans la dynamique agricole du pays, en raison de son potentiel de production et de sa contribution essentielle aux filières agroalimentaires nationales. Son climat, caractérisé par une variabilité spatio-temporelle significative des précipitations et des températures, influence directement les rendements agricoles, notamment ceux des cultures céréalières pluviales, qui sont particulièrement sensibles aux aléas météorologiques.

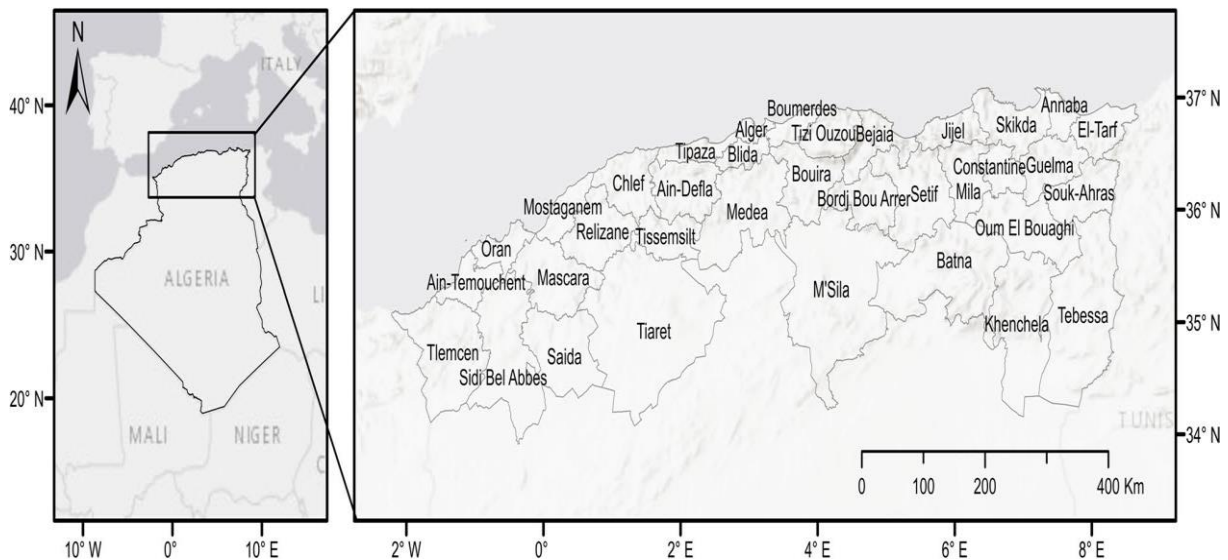


Figure 11. Localisation de la zone d'étude

2.2. Contexte Agroclimatique et Spécificités du Milieu

Située à l'interface des domaines climatiques méditerranéen et aride, la zone d'étude se focalise sur l'arrière-pays méditerranéen, en particulier la région steppique, qui s'étend sur de vastes plaines depuis les hauts plateaux algériens (Figure 11). Cet espace agroécologique est caractérisé par une diversité de formations végétales adaptées aux conditions semi-arides et steppiques, avec une dominance de parcours naturels et de cultures pluviales adaptées aux stress hydriques.

L'agriculture de cette région repose principalement sur la culture céréalière en régime pluvial, qui coexiste avec des systèmes d'élevage extensifs, notamment l'élevage ovin et bovin (MADR, 2019). Ce mode de production, bien qu'adapté aux conditions climatiques locales, demeure vulnérable face aux fluctuations interannuelles des précipitations et aux épisodes de sécheresse récurrents. En effet, les contraintes hydriques constituent un défi majeur pour la durabilité des systèmes agricoles, impactant non seulement les rendements céréaliers mais aussi la

disponibilité des ressources fourragères pour le cheptel. Plusieurs études (Benmehaia, 2020 ; 2023) soulignent ainsi que la variabilité climatique exacerbe l'instabilité de la production, avec des conséquences directes sur la sécurité alimentaire et les revenus des agriculteurs.

2.3. Caractéristiques Climatiques et Variabilité Spatio-Temporelle

Le climat méditerranéen dominant dans la région septentrionale se caractérise par des hivers relativement doux et humides, avec des températures oscillantes généralement entre 2 et 12°C, ainsi que par des étés chauds et secs, où les températures varient de 21 à 30°C. Toutefois, cette moyenne masque une hétérogénéité climatique importante entre les zones côtières et les régions intérieures.

Les zones littorales bénéficient d'une influence maritime modératrice, qui atténue les écarts thermiques et garantit un apport pluviométrique relativement stable. En revanche, les régions intérieures, situées au niveau des hauts plateaux et des plaines steppiques, enregistrent une diminution significative des précipitations et sont souvent exposées aux vents de sirocco, accentuant la sécheresse estivale. La répartition des pluies est marquée par une forte irrégularité interannuelle et intra-annuelle, entraînant une alternance de périodes de déficits hydriques et d'épisodes de précipitations soudaines, souvent insuffisantes pour compenser les besoins agricoles.

Les hivers dans les régions d'altitude sont fréquemment accompagnés de chutes de neige et de températures négatives, pouvant descendre en dessous de 0°C, tandis que les étés y sont caractérisés par des conditions arides et des températures élevées dépassant parfois les 40°C en période de canicule (Chourghal et al., 2016). Cette dualité climatique contribue à la structuration des écosystèmes agricoles et conditionne les choix cultureux, en favorisant des espèces résistantes au stress hydrique et thermique.

2.4. Potentiel Agricole et Contraintes de Production

La combinaison des influences climatiques méditerranéennes et continentales confère à cette région un potentiel considérable pour la céréaliculture pluviale. Bien qu'elle ne couvre que 10 % de la superficie nationale, elle assure plus de 90 % de la production céréalière du pays (MADR, 2019), ce qui lui confère un rôle stratégique dans la sécurité alimentaire de l'Algérie. Cependant, la forte dépendance de cette production aux conditions climatiques induit une variabilité interannuelle importante des rendements. L'irrégularité et la concentration des précipitations, la multiplication des épisodes de sécheresse ainsi que la dégradation progressive des sols accentuent la vulnérabilité de ce secteur (Benmehaia, 2020). Face à ces contraintes,

l'adoption de stratégies d'adaptation, telles que l'introduction de variétés résistantes à la sécheresse, l'amélioration des systèmes d'irrigation localisée ou encore la mise en œuvre de pratiques culturales conservatoires, apparaît comme une nécessité pour garantir la résilience des exploitations agricoles.

Les potentialités de la région reposent sur la disponibilité de sols profonds et fertiles, estimés à 1,8 million d'hectares, notamment dans la Mitidja, la vallée de la Soummam et les hautes plaines de Sétif–Miliana (CRSTRA, 2022). Ces sols présentent un indice de qualité supérieur à la moyenne nationale et une réserve utile variant de 120 mm/m en zone semi-aride à 200 mm/m en zone sub-humide (INRAA, 2021). En 2023, les emblavures céréalières couvraient 3,2 millions d'hectares, soit 92 % de la surface nationale, avec des rendements potentiels atteignant 4,5 t/ha pour le blé tendre irrigué et 3,0 t/ha pour le blé dur pluvial (ICARDA, 2023). La production de grains s'est ainsi élevée à 5,4 millions de tonnes, représentant 91 % de la collecte nationale (ONS, 2024). Ces performances sont soutenues par un appareil d'appui structuré, comprenant 85 % des capacités nationales de stockage, 78 % des unités de transformation, ainsi qu'un réseau météorologique dense (MADR, 2023 ; ONM, 2023).

Ces atouts demeurent toutefois fragilisés par une forte variabilité pluviométrique, avec une moyenne annuelle de 460 mm et un coefficient de variation compris entre 35 et 45 % (WMO, 2023). La campagne agricole 2022/23 a enregistré un déficit pluviométrique de 27 %, se traduisant par une baisse de rendement de 34 % (APS, 2023). La fréquence des sécheresses a par ailleurs plus que doublé depuis les années 2000, aggravant la pression sur les ressources agricoles (IPCC, 2022). À cela s'ajoutent des processus de dégradation des sols, marqués par une érosion hydrique estimée à 12 t/ha/an en moyenne, une salinisation croissante des terres irriguées dans la Mitidja et une perte annuelle de 0,5 % des terres arables (FAO, 2021 ; CRSTRA, 2022 ; World Bank, 2023). Les aléas thermiques renforcent cette vulnérabilité, les vagues de chaleur estivales entraînant une augmentation de +2,3 °C par rapport à la période 1970–2000 et réduisant la durée de remplissage du grain, tandis que les gelées tardives affectent régulièrement les hautes plaines (ONM, 2023 ; ICARDA, 2023).

Ces contraintes se traduisent par un écart important entre les rendements réels et les rendements potentiels. La moyenne enregistrée entre 2018 et 2023 s'élève à 1,9 t/ha, soit 55 % en deçà du potentiel estimé à 4,2 t/ha en conditions optimales (INRAA, 2023). L'instabilité des productions est élevée, avec un coefficient de variation de 28 % pour le blé dur et de 32 % pour l'orge sur la période 2000–2023 (FAOSTAT, 2024). Les pertes économiques attribuables aux aléas

climatiques atteignent en moyenne 1,1 milliard USD par an, soit près de 4 % de la valeur ajoutée agricole nationale (World Bank, 2023).

Face à ces défis, plusieurs leviers d'adaptation ont été testés et validés localement. L'utilisation de variétés tolérantes à la sécheresse, telles que le blé dur Ghery 1, permet des gains de rendement de 25 % en conditions de stress hydrique tout en réduisant les besoins en eau de 40 % (INRAA, 2023). Le recours au semis direct associé aux résidus végétaux améliore la productivité de 0,6 t/ha et diminue l'érosion de 22 % (ICARDA, 2022). Enfin, le développement de l'irrigation localisée, couvrant 4 500 hectares en 2023, assure des économies d'eau de 30 % et une augmentation des rendements de 20 % (MADR, 2023). Ces pratiques démontrent la pertinence d'une gestion intégrée des ressources et constituent des solutions concrètes pour renforcer la durabilité de la production céréalière dans un contexte de changements climatiques croissants.

3. Procédure de Projection des Données et du Climat

Les Modèles de Circulation Générale (GCM) constituent des outils fondamentaux et incontournables pour la projection des changements climatiques à l'échelle planétaire. L'exploitation de la sixième phase du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) s'impose comme une méthode de référence permettant d'anticiper les variables climatiques futures, et constitue une approche largement reconnue pour l'évaluation des dynamiques climatiques globales et régionales.

Dans le cadre de cette étude, deux ensembles distincts de données climatiques ont été intégrés : les données climatiques de référence et celles relatives aux projections climatiques futures. Ces données ont été obtenues à partir de la base de données WorldClim (WorldClim, 2021), reconnue pour sa fiabilité et son ample couverture géographique. Les données spécifiques aux cultures utilisées dans cette investigation couvrent la période allant de 2010 à 2019 et incluent des paramètres clés tels que les dates de semis et les superficies cultivées, conformément aux rapports officiels du Ministère Algérien de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR 2019).

Les données climatiques de référence mobilisées dans cette étude correspondent aux moyennes mensuelles des précipitations, des températures maximales et minimales, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de l'humidité relative pour la période 1970-2000 (Fick et Hijmans 2017). En ce qui concerne les projections climatiques futures, celles-ci ont été obtenues à partir

de données de modèles climatiques globaux à résolution réduite statistiquement (downscaling), issues du CMIP6. La correction des biais a été assurée via WorldClim2.1, garantissant ainsi une précision accrue des données à une résolution spatiale de 10 minutes (environ 340 km).

Plus spécifiquement, les températures mensuelles minimales et maximales (Tmin, Tmax) ainsi que les précipitations mensuelles ont été exploitées selon quatre scénarios d'émission correspondant aux trajectoires socio-économiques partagées (SSP), qui reflètent divers défis en matière d'adaptation et d'atténuation du changement climatique (O'Neill et al. 2017 ; Riahi et al. 2017).

Dans cette étude, quatre scénarios représentatifs des trajectoires futures d'émissions de gaz à effet de serre ont été sélectionnés. Il s'agit du SSP1-2.6 (faibles émissions), des SSP2-4.5 et SSP3-7.0 (émissions intermédiaires) ainsi que du SSP5-8.5 (fortes émissions). Ces scénarios appartiennent à la famille des Shared Socioeconomic Pathways (SSP) développée dans le cadre de CMIP6 et intégrée dans le 6^e rapport du GIEC (AR6, 2021-2025). Ces scénarios couvrent un spectre allant d'hypothèses optimistes de transition durable à des projections de fortes émissions reposant sur un usage intensif des énergies fossiles.

Le scénario SSP1-2.6 correspond à une trajectoire à faibles émissions, souvent qualifiée de « résilience verte », où la coopération internationale, la décarbonation rapide et les politiques de durabilité permettent de limiter le forçage radiatif à environ 2,6 W/m² en 2100, avec un réchauffement médian de l'ordre de 1,8 °C à l'horizon 2081–2100.

Les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0 représentent des voies intermédiaires à émissions modérées. Le premier (SSP2-4.5) illustre une trajectoire dite « middle-of-the-road », où les tendances actuelles se prolongent avec des progrès climatiques inégaux, conduisant à un réchauffement médian d'environ 2,7 °C. Le second (SSP3-7.0), qualifié de « rivalité régionale », traduit une fragmentation politique et un recours massif aux énergies fossiles, induisant un réchauffement d'environ 3,6 °C en fin de siècle.

Enfin, le scénario SSP5-8.5 incarne une trajectoire à fortes émissions, dite de « développement fossile », marquée par une croissance intensive en énergie et l'absence de politiques climatiques contraignantes. Ce scénario aboutit à un forçage radiatif proche de 8,5 W/m² et à un réchauffement médian de l'ordre de 4,4 °C à la fin du siècle.

Ces quatre scénarios constituent un éventail représentatif des futurs climatiques plausibles et sont largement utilisés comme référence pour les projections régionales et sectorielles. Ils permettent d'explorer à la fois des conditions favorables à l'adaptation et à l'atténuation (SSP1-

2.6), mais aussi des situations de forte vulnérabilité climatique (SSP3-7.0 et SSP5-8.5), fournissant ainsi un cadre robuste pour l'évaluation des impacts et des risques.

Ces projections climatiques futures sont issues du modèle CMCC-ESM2, sélectionné pour sa robustesse et sa pertinence dans la modélisation des variables climatiques clés.

Le choix du modèle CMCC-ESM2 repose sur sa forte corrélation avec les moyennes multi-modèles des ensembles CMIP5 et CMIP6, traduisant ainsi sa capacité éprouvée à simuler avec précision les processus climatiques essentiels. Ses projections des évolutions de température et de précipitations se distinguent par leur cohérence avec les tendances observées et les résultats d'autres modèles, en faisant un outil de choix pour l'évaluation des impacts climatiques dans les régions vulnérables comme l'Algérie.

En particulier, le modèle CMCC-ESM2 se distingue par sa capacité à représenter avec précision les dynamiques climatiques propres aux zones semi-arides. Son intégration des avancées récentes en modélisation climatique renforce sa pertinence pour l'évaluation des impacts futurs dans des contextes similaires (Lovato 2022). Bien que les études exploitant les modèles CMIP6 dans des régions semi-arides spécifiques demeurent limitées, la précision et la fiabilité démontrées du modèle CMCC-ESM2 dans divers contextes justifient son adoption pour fournir des données climatiques fiables dans cette région (Lovato 2022 ; Sahabi-Abed et al. 2023).

Enfin, les données relatives aux projections des scénarios de changement climatique issues du Coupled Model Intercomparison Project ont été extraites du modèle climatique MPI (Max Planck Institute for Meteorology) afin de servir d'intrants dans le modèle CROPWAT, permettant ainsi une évaluation rigoureuse des impacts du climat sur les cultures (Sahabi-Abed et al. 2023 ; Gabr 2023).

4. Mise en Œuvre du Modèle de Culture

L'estimation et l'analyse des besoins en eau des cultures (CWR, Crop Water Requirements) sous divers scénarios climatiques représentent un axe central pour comprendre la vulnérabilité et la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique. Les CWR correspondent à la quantité d'eau nécessaire pour compenser l'évapotranspiration des cultures, de manière à assurer leur développement optimal et leur rendement potentiel. Ils constituent ainsi un indicateur clé permettant d'évaluer la pression exercée sur les ressources hydriques et d'anticiper les besoins en irrigation dans des contextes climatiques présents et futurs.

Parmi les méthodes disponibles, l'utilisation du logiciel CROPWAT est fortement recommandée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2009). Cet outil, fondé sur la méthode de Penman-Monteith (FAO-56), fournit une approche normalisée et scientifiquement reconnue pour le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0) et l'estimation des CWR. Sa conception vise à répondre aux besoins des chercheurs, planificateurs et gestionnaires en offrant un cadre unifié pour la planification de l'irrigation et la gestion durable de l'eau agricole. L'un des atouts majeurs de CROPWAT réside dans sa capacité d'intégration des données climatiques : il permet aussi bien l'utilisation de séries historiques que l'exploitation de projections climatiques issues des modèles globaux et régionaux (notamment ceux du CMIP6), ce qui en fait un outil particulièrement adapté pour les études prospectives.

Au fil du temps, CROPWAT a acquis une place privilégiée dans la littérature scientifique et technique. Il a été utilisé dans des contextes géographiques et agroclimatiques très variés pour analyser l'impact des changements environnementaux sur les besoins en eau des cultures (Gabr, 2022 ; Yetik et Şen, 2023 ; Yalcin, 2024). De nombreuses études ont confirmé la robustesse et la fiabilité de ses estimations, en soulignant leur cohérence avec les observations de terrain et les mesures expérimentales, que ce soit dans des systèmes de monoculture ou des systèmes de cultures multiples (Soomro et al., 2023 ; Gebremariam et al., 2021). Cette validation empirique contribue à renforcer la confiance dans son utilisation comme outil de prévision et de planification.

Plusieurs travaux comparatifs ont par ailleurs mis en évidence la supériorité de CROPWAT face à d'autres modèles alternatifs. Kang et al. (2009), par exemple, ont démontré sa précision accrue dans l'estimation de l'évapotranspiration de référence, ce qui constitue un élément déterminant pour l'évaluation des CWR. Ce constat a été corroboré par d'autres recherches qui ont souligné la capacité du logiciel à s'adapter à des conditions environnementales contrastées, allant des climats arides aux zones tempérées. L'universalité et la flexibilité de l'outil expliquent ainsi sa large adoption à l'échelle mondiale.

En outre, l'apport de CROPWAT ne se limite pas à la simple estimation quantitative des besoins hydriques. Il favorise également une meilleure compréhension des interactions entre climat, sol et culture, et ouvre la voie à l'élaboration de stratégies d'adaptation ciblées. En intégrant des scénarios climatiques futurs, il permet de simuler la variabilité possible de la demande en eau et d'identifier les risques de déséquilibre entre disponibilité et consommation. Cela en fait un

instrument d'aide à la décision incontournable pour les politiques agricoles et hydriques, notamment dans les régions vulnérables au stress hydrique.

Ainsi, l'utilisation de CROPWAT comme outil de référence offre un double avantage : d'une part, il fournit une méthodologie scientifiquement validée et largement adoptée pour l'estimation des besoins en eau ; d'autre part, il constitue une base solide pour développer des stratégies de gestion durable des ressources hydriques dans un contexte de variabilité climatique accrue. Sa reconnaissance internationale, appuyée par une littérature scientifique abondante, en fait un cadre théorique incontournable dans les études agroclimatiques et les travaux de prospective agricole.

5. Description du modèle CROPWAT

Le choix du modèle CROPWAT dans cette étude repose sur son efficacité avérée pour l'estimation des besoins en eau des cultures (Crop Water Requirements, CWR) et la planification de l'irrigation dans une grande diversité de conditions climatiques. Conçu par la FAO (2009), CROPWAT s'appuie sur une approche normalisée fondée sur la méthode de Penman-Monteith (FAO-56) pour le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0), considérée comme la référence internationale en matière de modélisation agroclimatique.

Le fonctionnement du modèle repose sur l'intégration de plusieurs paramètres essentiels :

Les stades de croissance : CROPWAT considère des phases de développement prédéfinies (initial, croissance, intermédiaire et maturation), ce qui permet de modéliser l'évolution des besoins en eau au cours du cycle phénologique de la culture.

Les coefficients culturaux (K_c) : ils traduisent la relation entre l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et l' ET_0 . Ces coefficients, établis par la FAO, varient en fonction du type de culture et de son stade de développement.

L'efficacité d'irrigation : le modèle suppose une uniformité de l'efficacité d'irrigation, ce qui facilite la standardisation des calculs mais peut différer des conditions réelles où l'efficacité varie selon la méthode employée (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte).

Ces hypothèses et paramètres permettent d'obtenir des estimations fiables et comparables à l'échelle régionale ou internationale. Toutefois, elles comportent également certaines limites. L'utilisation de coefficients culturaux génériques, par exemple, ne reflète pas toujours les spécificités locales liées aux pratiques agricoles, à la variabilité des sols ou aux microclimats.

De même, la fixation de stades de croissance standards tend à simplifier la réalité biologique des cultures, qui peut être fortement influencée par des facteurs environnementaux ou technologiques (variétés améliorées, pratiques culturales). Enfin, l'hypothèse d'une efficacité d'irrigation uniforme ne tient pas compte des pertes hydriques liées aux conditions locales, telles que l'évaporation, l'infiltration ou les contraintes techniques des systèmes d'irrigation.

Malgré ces limites, CROPWAT demeure un outil de référence grâce à sa simplicité d'utilisation, sa robustesse méthodologique et sa large adoption dans la communauté scientifique. Il constitue un compromis pertinent entre précision et applicabilité, permettant de réaliser des analyses comparatives fiables tout en offrant une flexibilité pour l'intégration de scénarios climatiques futurs. Ainsi, son utilisation dans le cadre de la présente étude apparaît justifiée, car elle permet d'évaluer de manière cohérente l'impact du changement climatique sur les besoins en eau des cultures et d'orienter la réflexion vers des stratégies d'adaptation agricole adaptées aux contextes locaux.

6. Description du modèle climatique CMCC-ESM2

En complément du modèle de culture, le modèle CMCC-ESM2 (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – Earth System Model version 2) a été sélectionné pour la modélisation climatique en raison de sa capacité éprouvée à représenter avec justesse les dynamiques atmosphériques et hydrologiques caractéristiques des régions méditerranéennes et semi-arides (Cherchi et al., 2022 ; Scoccimarro et al., 2022). Son choix se justifie particulièrement par la pertinence de ses simulations pour les conditions climatiques spécifiques de l'Algérie, marquées par une forte variabilité interannuelle des précipitations et une sensibilité accrue aux épisodes de sécheresse (IPCC, 2021 ; Trambly & Somot, 2021).

Le CMCC-ESM2 fait partie de la nouvelle génération des modèles climatiques développés dans le cadre de l'initiative CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). Il repose sur une modélisation intégrée des processus climatiques et biophysiques, en tenant compte de plusieurs hypothèses clés :

- les interactions couplées entre l'atmosphère, l'océan, la biosphère et la cryosphère, qui permettent de simuler les rétroactions complexes du système climatique (Eyring et al., 2016) ;
- la stabilité climatique à long terme pour l'initialisation des simulations, condition essentielle pour assurer la robustesse des projections futures (Lovato et al., 2022) ;

- les changements d'occupation et d'utilisation des sols, intégrés conformément aux trajectoires définies par les Scénarios Socio-économiques Partagés (SSP), afin de représenter de manière cohérente l'impact des activités humaines sur le climat (Riahi et al., 2017).

L'un des points forts du CMCC-ESM2 est sa capacité de représentation régionale dans le bassin méditerranéen, grâce à une résolution spatiale ($\sim 1^\circ$) et temporelle (3 h–daily) qui permet de capturer les principales tendances climatiques (pluviométrie saisonnière, régimes thermiques, variabilité interannuelle) (Cherchi et al., 2022). Des évaluations multi-modèles CMIP6 montrent que CMCC-ESM2 reproduit de façon réaliste les caractéristiques du climat méditerranéen, notamment la répartition saisonnière des précipitations et les vagues de chaleur estivales (Scanlon et al., 2022), deux paramètres critiques pour l'agriculture pluviale en Algérie (Driouech et al., 2020).

Toutefois, malgré ces atouts, certaines limites doivent être soulignées. Comme pour la plupart des modèles climatiques globaux, le CMCC-ESM2 peut présenter des incertitudes à des échelles spatiales fines (inférieures à quelques dizaines de kilomètres) en raison de sa résolution limitée, ce qui peut réduire la précision des projections locales (Giorgi et al., 2021). La modélisation des événements extrêmes (sécheresses prolongées, pluies intenses, vagues de chaleur exceptionnelles) reste également sujette à des marges d'erreur plus élevées que pour les tendances climatiques de long terme (Seneviratne et al., 2021). Ces limites soulignent la nécessité de recourir à des techniques de descente d'échelle – statistique (Driouech et al., 2020) ou dynamique via des simulations en régionalisation (COSMO-CLM, ALADIN-Climat) – afin d'adapter les résultats du modèle aux échelles locales pertinentes pour la gestion agricole et hydrique en Algérie (Fita et al., 2019 ; Trambly & Somot, 2021).

En résumé, le modèle CMCC-ESM2 offre une approche robuste et scientifiquement validée pour la projection du climat futur dans les régions méditerranéennes et semi-arides (Cherchi et al., 2022). Son intégration dans cette étude permet de générer des scénarios climatiques cohérents avec les spécificités de l'Algérie et de mieux anticiper l'impact potentiel du changement climatique sur les besoins en eau des cultures (IPCC, 2021).

7. Détermination des Besoins en Eau des Cultures (CWR)

Les besoins en eau des cultures (Crop Water Requirements, CWR) constituent un indicateur fondamental pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de production agricole. Ils désignent la quantité d'eau nécessaire pour compenser les pertes par évapotranspiration de

manière à garantir un développement normal de la culture et l'atteinte de son rendement potentiel (FAO, 2009). Ces besoins sont déterminés par un ensemble de facteurs interdépendants : conditions climatiques (température, rayonnement solaire, humidité relative, vent et pluviométrie), superficie cultivée, nature et capacité de rétention en eau des sols, durée des cycles cultureux et succession des rotations agricoles (Allen et al., 1998).

Afin d'évaluer les CWR dans différents contextes agro-climatiques, le logiciel CROPWAT, développé par la FAO (Clarke et al., 1998) et mis à jour régulièrement (Soomro et al., 2023), constitue une référence méthodologique largement utilisée. Ce modèle repose sur la méthode Penman-Monteith (FAO-56), recommandée à l'échelle internationale pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_0 ; Allen et al., 1998). Il intègre différents modules permettant de prédire les besoins en eau, de planifier les calendriers d'irrigation et d'optimiser la gestion hydrique des cultures (Soomro et al., 2023). L'avantage de cette approche réside dans son caractère standardisé et comparatif, permettant une utilisation cohérente à l'échelle régionale et internationale.

Dans le cadre de CROPWAT, les besoins en eau des cultures sont évalués à travers deux grandeurs essentielles :

- l'évapotranspiration des cultures (ET_c), qui correspond à la quantité d'eau réellement consommée par la culture au cours de son développement ;
- les CWR proprement dits, qui désignent la quantité d'eau devant être fournie pour répondre à ces besoins hydriques, en complément ou en substitution des précipitations effectives (FAO, 2009).

L' ET_c est estimée sur une base décadaire à partir de la relation suivante :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \text{ (Allen et al., 1998)}$$

où :

- ET_c est l'évapotranspiration réelle de la culture (mm jour^{-1}) ;
- ET_0 est l'évapotranspiration de référence (mm jour^{-1}) ;
- K_c est le coefficient cultural propre à chaque stade de croissance.

Le coefficient cultural (K_c) est un paramètre déterminant qui traduit la spécificité physiologique de chaque culture et son interaction avec l'environnement. Sa valeur dépend du type de culture,

de la densité du couvert végétal, de l'albédo, de la résistance stomatique et des caractéristiques pédo-climatiques (texture et humidité du sol, taux d'évaporation, vitesse et direction du vent) (Jensen et al., 2018). Comme les besoins hydriques varient selon le stade de développement, le coefficient K_c fluctue tout au long du cycle phénologique. La FAO distingue quatre phases principales (Allen et al., 1998) :

- *Phase initiale* : faible demande en eau, dominée par l'évaporation du sol nu.
- *Phase de développement* : forte augmentation des besoins liée à l'expansion du couvert végétal.
- *Phase de mi-saison* : demande maximale, correspondant au stade de couverture complète et à la forte transpiration.
- *Phase de fin de saison* : diminution progressive de l' ET_c associée à la sénescence et à la réduction de l'activité physiologique.

Les valeurs de K_c et la durée des phases de croissance utilisées dans cette étude ont été déterminées sur la base des recommandations du document FAO Irrigation and Drainage Paper n°56 (Allen et al., 1998), adaptées au contexte de la région méditerranéenne (Todorovic et al., 2013).

D'autre part, l'évapotranspiration de référence (ET_0) – paramètre central pour le calcul des CWR – est estimée par la formule de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

où :

R_n = rayonnement net à la surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) ;

G = flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) ;

T = température moyenne de l'air ($^{\circ}\text{C}$) ;

u_2 = vitesse du vent à 2 m (m s^{-1}) ;

e_s et e_a = pression de vapeur saturante et réelle (kPa) ;

Δ = pente de la courbe de pression de vapeur ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;

γ = constante psychrométrique ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

La méthode de Penman-Monteith est reconnue comme la plus fiable car elle intègre de manière optimale les principales variables climatiques influençant l'évapotranspiration (Allen et al., 1998). Comparée à d'autres méthodes empiriques (Blaney-Criddle, Hargreaves, Thornthwaite), elle offre une robustesse accrue et une meilleure représentativité des processus physiques, en particulier dans les régions à forte variabilité climatique comme la Méditerranée (Soomro et al., 2023 ; Todorovic et al., 2013).

En résumé, la détermination des besoins en eau des cultures par CROPWAT, fondée sur la combinaison $ET_0 - K_c - ET_c$, constitue une approche méthodologique robuste, scientifiquement validée et largement adoptée (FAO, 2009 ; Allen et al., 1998). Elle permet non seulement de quantifier les CWR avec précision, mais aussi d'analyser leur évolution sous différents scénarios climatiques, ouvrant ainsi la voie à une planification rationnelle et durable de l'irrigation (Soomro et al., 2023 ; Jensen et al., 2018).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre 7 : Résultats et Discussions

1. Introduction

La présente section expose et analyse les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude. L'objectif est de mettre en évidence les évolutions attendues sous l'effet du changement climatique et d'en discuter les implications pour l'agriculture dans la zone d'étude. Étant donné que la région se caractérise par un climat semi-aride marqué par une pluviométrie limitée et une dépendance accrue aux ressources en eau souterraine, l'évaluation des changements futurs est cruciale pour anticiper les contraintes hydriques susceptibles d'affecter la production agricole.

L'analyse est structurée autour de trois volets complémentaires :

- Les projections climatiques portant sur les tendances futures des températures et des précipitations,
- Les répercussions sur l'évapotranspiration de référence (ET_0), en tant qu'indicateur clé de la demande atmosphérique en eau,
- Les conséquences sur les besoins en eau des cultures (CWR), afin d'apprécier les ajustements nécessaires pour maintenir la durabilité de la production agricole.

Les résultats présentés ci-après sont discutés en tenant compte des incertitudes liées aux scénarios climatiques, tout en mettant en lumière les implications pratiques pour la gestion des ressources hydriques et l'adaptation des systèmes agricoles locaux.

2. Changements futurs de température et de précipitations

2.1. Période de référence (1970-2000)

La température minimale annuelle moyenne (**T_{min}**) calculée sur la période de référence 1970-2000 est de $13,9\text{ °C} \pm 0,4\text{ °C}$. Le cycle saisonnier révèle une amplitude thermique de $17,1\text{ °C}$, avec un minimum hivernal en janvier ($3,9\text{ °C}$) et un maximum estival en juillet/août ($22,1\text{ °C}$).

La température maximale annuelle moyenne (**T_{max}**) calculée sur la période de référence 1970-2000 est de 25,7 °C ± 0,5 °C. Le cycle saisonnier présente une amplitude thermique de 21,6 °C, avec un maximum estival en juillet (36,7 °C) et un minimum hivernal en janvier (15,1 °C) (Figures 12 et 13).

Les valeurs de cette période constituent la référence pour l'évaluation des scénarios futurs.

2.2. Température minimale : Projections par scénario (2021-2100)

Les simulations issues du modèle CMCC-ESM2 indiquent une hausse progressive de la T_{min} sous tous les scénarios d'émissions. L'ampleur et la rapidité de ce réchauffement sont fortement dépendantes des trajectoires socio-économiques considérées (Tableau 5).

Tableau 5. Hausse projetée de la T_{min} annuelle moyenne (°C) par rapport à 1970-2000

Scénario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Hausse totale
SSP1-2.6	+1,0	+1,5	+1,8	+1,9	+1,9 °C (faible)
SSP2-4.5	+1,1	+1,9	+2,6	+3,0	+3,0 °C (modérée)
SSP3-7.0	+1,2	+2,2	+3,2	+3,8	+3,8 °C (élevée)
SSP5-8.5	+1,3	+2,5	+3,8	+4,9	+4,9 °C (extrême)

Durant la saison hivernale (décembre-janvier-février), le réchauffement projeté est particulièrement prononcé, avec une hausse des températures pouvant atteindre +5,1 °C en janvier d'ici 2100 selon le scénario SSP5-8.5. En période estivale (juin-juillet-août), l'augmentation est plus modérée, allant de +3,5 °C en juillet sous SSP1-2.6 à +6,2 °C sous SSP5-8.5. L'amplitude thermique saisonnière diminue de 1,2 à 2,1 °C selon les scénarios, traduisant une homogénéisation du climat, en particulier du fait d'un réchauffement hivernal plus rapide que celui de l'été.

Les projections issues du modèle CMCC-ESM2 s'inscrivent dans les tendances identifiées par le GIEC (AR6, 2021) et des études régionales telles que celle de Coppola et al. (2021), qui soulignent un réchauffement plus marqué des températures minimales comparativement aux maximales. Ce différentiel est en grande partie imputé à l'effet d'emprisonnement radiatif nocturne (Davy et al., 2017), un phénomène accentué par l'urbanisation croissante et la présence d'îlots de chaleur urbains.

Les implications de ces changements sont multiples. Sur le plan agricole, le réchauffement hivernal sous SSP5-8.5 pourrait compromettre la dormance des cultures pérennes, notamment les vergers, augmentant ainsi leur vulnérabilité face aux gelées tardives (Luedeling, 2012). En matière de santé publique, les projections indiquent une augmentation significative des vagues de chaleur nocturnes (températures minimales $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$) d'ici la fin du siècle sous les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5, ce qui pourrait accroître les risques sanitaires, particulièrement en zones urbaines (Vicedo-Cabrera et al., 2021). Concernant la biodiversité, certaines espèces dépendantes d'hivers rigoureux, notamment certaines plantes à dormance hivernale, pourraient être confrontées à des déséquilibres énergétiques et phénologiques (Buckley et al., 2013).

Toutefois, malgré une cohérence générale des projections climatiques, certaines incertitudes persistent, notamment en ce qui concerne la représentation de la variabilité interannuelle dans les zones côtières, où un biais négatif de l'ordre de $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été observé. L'intégration de simulations climatiques régionales à plus haute résolution, comme celles du programme CORDEX, pourrait permettre d'affiner la représentation des impacts locaux. Enfin, il est important de souligner que seul le scénario SSP1-2.6 permet de maintenir le réchauffement en deçà de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'horizon 2100, conformément aux objectifs de l'Accord de Paris, ce qui renforce la nécessité de mettre en œuvre des politiques climatiques ambitieuses en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (UNEP, 2022).

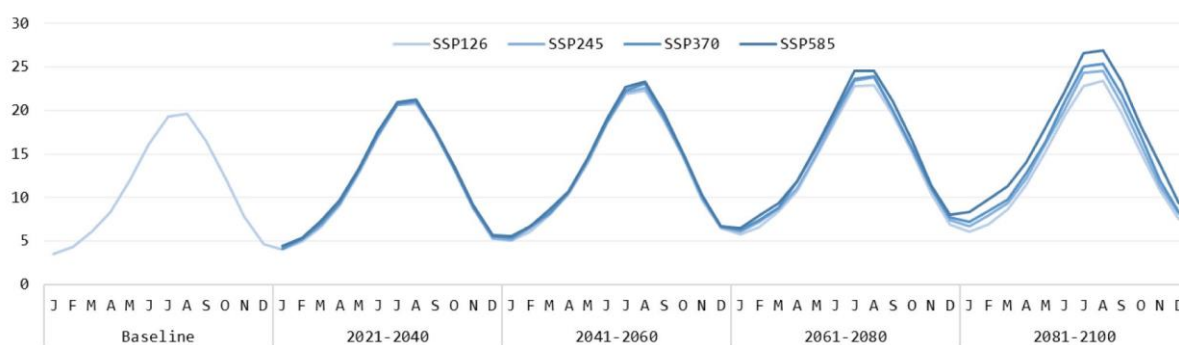


Figure 12. Projection de la température minimale durant la période 2021-2100 selon les scénarios

2.3. Température maximale : Projections par scénario (2021-2100)

Les projections issues du modèle CMCC-ESM2 indiquent une hausse progressive et marquée de la **Tmax** sous tous les scénarios (Tableau 6). Les trajectoires d'émissions influencent fortement l'ampleur du réchauffement : les scénarios optimistes (SSP1-2.6) limitent l'augmentation à +2,7 °C en fin de siècle, tandis que le scénario extrême SSP5-8.5 projette une hausse de +6,0 °C, traduisant un emballement thermique.

Tableau 6. Évolution de la Tmax moyenne annuelle (°C) par rapport à 1970-2000

Scénario	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	Hausse totale
SSP1-2.6	+1,1	+2,1	+2,6	+2,7	+2,7 °C
SSP2-4.5	+1,2	+2,4	+3,3	+3,8	+3,8 °C
SSP3-7.0	+1,3	+2,9	+4,0	+4,6	+4,6 °C
SSP5-8.5	+1,4	+3,2	+4,8	+6,0	+6,0 °C

À l'horizon 2081–2100, les projections climatiques indiquent une augmentation significative des températures maximales saisonnières. Durant la saison chaude (juin-juillet-août), la température maximale moyenne atteint 43,3 °C en juillet sous le scénario SSP5-8.5, soit une élévation de +6,4 °C par rapport à la période de référence 1970–2000. En comparaison, sous SSP1-2.6, cette augmentation reste limitée à +3,3 °C, avec une température de 40,0 °C. En saison froide (décembre-janvier-février), la température maximale de janvier s'élève à 20,8 °C sous SSP5-8.5 (+5,7 °C) et à 17,6 °C sous SSP1-2.6 (+2,5 °C). Ces évolutions traduisent une réduction de l'amplitude thermique saisonnière d'environ 1,8 °C sous SSP5-8.5, témoignant d'une homogénéisation progressive du climat, avec un réchauffement hivernal plus marqué que celui de l'été.

Les tendances simulées par le modèle CMCC-ESM2 sont cohérentes avec les résultats présentés par le GIEC (AR6) et corroborées par les travaux de Seneviratne et al. (2021), qui mettent en évidence une élévation plus rapide des températures maximales (Tmax) que des minimales (Tmin) dans les régions subtropicales. Ce phénomène est accentué durant la saison sèche, en raison de rétroactions complexes impliquant les surfaces terrestres et la réduction de l'évapotranspiration (Seneviratne et al., 2013).

Les seuils critiques d'impact sont clairement franchis sous les scénarios d'émissions élevées. Concernant les vagues de chaleur, le scénario SSP5-8.5 prévoit une multiplication par quatre de la fréquence annuelle des journées où la température dépasse 40 °C, passant d'environ 10 jours/an durant la période 1970–2000 à 40 jours/an à la fin du siècle. En comparaison, SSP1-2.6 limite cette augmentation à 15 jours/an, ce qui permettrait de contenir les risques sanitaires associés à ces extrêmes (Mora et al., 2017). Sur le plan agricole, le stress thermique durant la floraison estivale est susceptible d'induire une réduction significative des rendements, notamment pour les cultures de blé. Les pertes sont estimées entre –15 % (SSP1-2.6) et –35 % (SSP5-8.5), en lien avec la sensibilité de cette phase phénologique aux températures extrêmes (Asseng et al., 2015). En ce qui concerne les ressources en eau, l'augmentation de l'évapotranspiration, estimée à environ +8 % par degré Celsius de réchauffement, intensifie la demande hydrique pendant l'été, exacerbant la vulnérabilité des zones semi-arides (Cook et al., 2018).

Malgré la robustesse des tendances observées, certaines incertitudes persistent. Le modèle CMCC-ESM2 présente un biais positif d'environ +0,4 °C pour les Tmax estivales dans les régions arides, ce qui pourrait conduire à une surestimation locale des extrêmes (Coppola et al., 2021). L'utilisation de simulations climatiques régionales à haute résolution, telles que celles produites dans le cadre de CORDEX-AFRICA, apparaît nécessaire pour affiner l'évaluation des impacts au niveau local. Par ailleurs, en matière d'adaptation, la mise en œuvre de stratégies agricoles intégrées devient essentielle. Celles-ci incluent notamment la sélection de variétés thermo-tolérantes, l'adoption de techniques d'irrigation déficitaire, et l'ajustement des calendriers culturels, particulièrement sous les scénarios intermédiaires et pessimistes (SSP3-7.0 et SSP5-8.5).

Les projections de la température maximale révèlent une trajectoire non linéaire, marquée par un point d'inflexion après 2050 en cas de maintien des trajectoires d'émissions élevées. Le scénario optimiste SSP1-2.6 permettrait de contenir l'augmentation de la Tmax à un niveau relativement gérable, soit environ +2,7 °C, tandis que le scénario SSP5-8.5 conduit à un réchauffement extrême atteignant +6,0 °C. Ce dernier scénario implique des conséquences potentiellement irréversibles pour les écosystèmes, la sécurité alimentaire et la santé humaine. Ces résultats renforcent la nécessité de politiques climatiques ambitieuses et rapides visant à limiter le réchauffement global et à prévenir une dégradation accrue des conditions de vie.

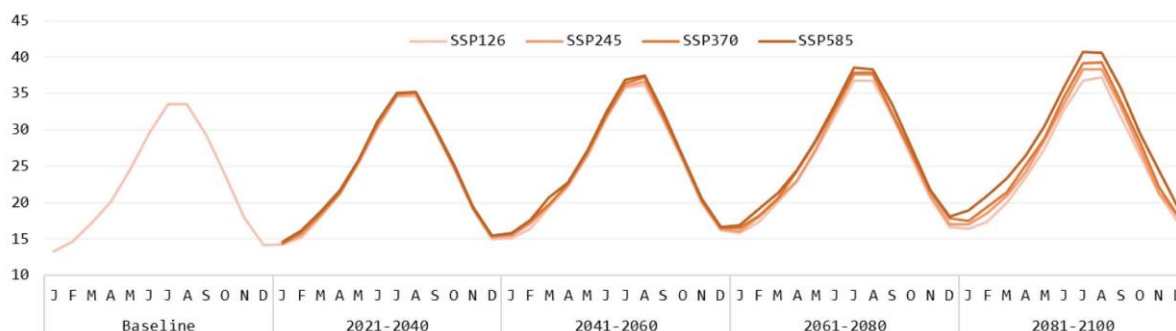


Figure 13. Projection de la température maximale durant la période 2021-2100 selon les scénarios

2.4. Changements projetés de la précipitation

2.4.1. Les projections de précipitations sous SSP1-2.6

L'analyse des projections climatiques sous le scénario SSP1-2.6 révèle des variations significatives des précipitations au sein de la zone d'étude, tant en termes saisonniers qu'interannuels. Globalement, la tendance dominante demeure une diminution des apports pluviométriques, particulièrement marquée en hiver et en automne, alors que des hausses ponctuelles apparaissent au cours du printemps et de l'été.

Durant la première période (2021–2040), les déficits pluviométriques se manifestent de manière généralisée, avec des baisses notables atteignant –31 % en janvier et –22 % en novembre. Seuls les mois de juin et juillet se maintiennent à des niveaux proches de la stabilité. La période suivante (2041–2060) traduit une atténuation relative des déficits hivernaux (–20 % en janvier, –15 % en février), mais introduit une augmentation remarquable des précipitations en juin (+14 %), suggérant un décalage saisonnier des apports hydriques.

Les horizons plus lointains confirment ces tendances contrastées. Entre 2061 et 2080, certaines améliorations apparaissent, notamment en mai (0 %), juin (+11 %), juillet (+1 %) et octobre (+3 %), mais elles demeurent insuffisantes pour compenser les pertes persistantes en hiver (jusqu'à –18 % en février et –16 % en décembre). En fin de siècle (2081–2100), le déficit se maintient surtout en avril (–25 %) et en hiver (novembre –22 %, décembre –20 %), tandis que de légères hausses sont enregistrées en mai (+5 %), juin (+6 %) et juillet (+1 %).

L'examen saisonnier met en évidence trois dynamiques principales :

- Un déficit structurel en hiver et en automne, qui menace directement la recharge hydrique et la disponibilité en eau pour les cultures d'hiver.

- Des variations printanières contrastées, avec une baisse persistante en avril mais des signes de reprise en mai, ce qui pourrait affecter les cycles culturels sensibles à cette période.
- Une tendance à la stabilisation estivale, accompagnée de hausses modestes en juin et juillet, traduisant une redistribution des précipitations vers la saison chaude.

Ces résultats soulignent que même dans un scénario optimiste tel que SSP1-2.6, la zone d'étude connaîtrait une diminution globale de ses précipitations, associée à une réorganisation saisonnière défavorable aux équilibres hydriques. La perte des apports hivernaux et automnaux pourrait accentuer les pressions sur les ressources en eau, tandis que l'augmentation estivale, souvent moins efficace en raison de l'évapotranspiration élevée, n'apporterait qu'une compensation limitée.

2.4.2. Les projections de précipitations sous SSP2-4.5

Les projections issues du scénario SSP2-4.5 mettent en évidence une dynamique comparable à celle observée sous SSP1-2.6, avec une prédominance de déficits pluviométriques, mais également quelques périodes d'amélioration relative. Dans l'ensemble, les précipitations futures de la zone d'étude seraient caractérisées par une réduction globale en hiver et en automne, accompagnée d'augmentations ponctuelles au printemps et au début de l'été, suggérant une redistribution saisonnière des apports hydriques.

Au cours de la première période (2021–2040), les diminutions demeurent généralisées, atteignant –22 % en avril, –20 % en mai et jusqu'à –18 % en novembre. La période suivante (2041–2060) introduit des signaux contrastés : si les déficits persistent en hiver et en automne (–27 % en janvier, –24 % en décembre), une hausse de +7 % en février et de +9 % en juin, associée à une légère augmentation en juillet (+1 %), témoigne d'un déplacement saisonnier des précipitations.

Entre 2061 et 2080, la tendance se nuance davantage. Certains mois enregistrent des hausses notables, comme mai (+10 %), juin (+5 %) et septembre (+4 %), tandis que les diminutions se concentrent sur l'hiver (–16 % en février, –25 % en novembre). Enfin, pour la fin du siècle (2081–2100), les déficits reprennent une intensité marquée, notamment en avril (–23 %), novembre (–18 %) et décembre (–20 %). Quelques hausses localisées persistent, mais elles restent insuffisantes pour inverser la tendance générale.

L'analyse saisonnière confirme ainsi trois constats majeurs :

- Un déficit structurel hivernal et automnal, qui pourrait réduire la recharge des nappes et fragiliser les cultures d'hiver.
- Des hausses ponctuelles au printemps et en début d'été, en particulier en février, mai et juin, traduisant un décalage dans la répartition saisonnière des pluies.
- Une forte variabilité inter-périodes, suggérant une accentuation de l'irrégularité pluviométrique à mesure que l'on avance dans le siècle.

En somme, le scénario SSP2-4.5 confirme la tendance à une diminution globale des précipitations, mais laisse apparaître une redistribution temporelle plus marquée que dans SSP1-2.6. Si les déficits hivernaux et automnaux semblent inévitables, l'augmentation relative des précipitations au printemps et en début d'été pourrait partiellement atténuer les impacts, bien que cette redistribution demeure défavorable dans un contexte de forte évapotranspiration estivale.

2.4.3. Les projections de précipitations sous SSP3-7.0

Les projections associées au scénario SSP3-7.0 révèlent une accentuation des déficits pluviométriques par rapport aux scénarios plus optimistes, traduisant un renforcement des pressions climatiques sur la zone d'étude. Globalement, l'évolution se caractérise par une diminution généralisée des précipitations, particulièrement marquée au printemps et en hiver, avec seulement de rares signes d'amélioration ponctuelle.

Durant la première période (2021–2040), la majorité des mois enregistrent des baisses notables, allant jusqu'à –23 % en janvier et en novembre. Seul le mois de juillet connaît une légère augmentation (+1 %). La période 2041–2060 conserve cette dynamique déficitaire, mais avec quelques améliorations limitées, telles que +5 % en juin et +1 % en juillet, contrastant avec de fortes diminutions au printemps (–22 % en avril).

L'horizon 2061–2080 apparaît comme le plus critique, avec des déficits sévères et persistants, en particulier en avril (–31 %), janvier (–28 %) et mars (–15 %). Cette période ne montre quasiment aucune compensation positive, à l'exception d'un faible +2 % en septembre. Enfin, la fin du siècle (2081–2100) reste marquée par une situation défavorable : des baisses importantes en avril (–28 %), janvier (–24 %) et novembre (–20 %), avec seulement une stabilisation relative en octobre (0 %) et de très faibles variations proches de zéro en été.

Sur le plan saisonnier, trois constats principaux émergent :

- Un effondrement marqué des précipitations hivernales et printanières, atteignant des valeurs supérieures à –30 % (avril 2061–2080), compromettant gravement la recharge hydrique et la disponibilité en eau agricole.
- Une relative stabilité estivale, bien que les augmentations demeurent marginales (+1 à +5 % en juin-juillet selon les périodes).
- Un automne déficitaire, où novembre se distingue par des diminutions persistantes (jusqu’à –23 % en 2021–2040 et –20 % en 2081–2100).

Ces résultats indiquent que sous le scénario SSP3-7.0, la zone d’étude subirait une intensification des déficits pluviométriques, nettement plus marquée que dans SSP1-2.6 et SSP2-4.5. La combinaison d’une perte hivernale et printanière significative et d’une faible compensation estivale accentuerait le risque de sécheresse structurelle et fragiliserait la durabilité des systèmes agro-hydriques.

2.4.4. Les projections de précipitations sous SSP5-8.5

Les projections issues du scénario SSP5-8.5, correspondant à une trajectoire d’émissions élevées, traduisent une intensification significative des déficits pluviométriques dans la zone d’étude, avec des pertes beaucoup plus marquées que dans les scénarios précédents. Globalement, la tendance est à une réduction quasi généralisée des précipitations, accompagnée de quelques hausses ponctuelles mais insuffisantes pour compenser les déficits structurels.

Dès la première période (2021–2040), les diminutions apparaissent dans la majorité des mois, atteignant –22 % en décembre et –20 % en janvier. Toutefois, une anomalie positive notable est observée en mars (+12 %), suggérant une variabilité accrue dans la répartition saisonnière. La période 2041–2060 confirme l’aggravation du déficit, avec des baisses atteignant –25 % en avril et en novembre, et des diminutions quasi généralisées sur l’ensemble des saisons.

Entre 2061 et 2080, la situation devient critique, notamment en avril (–32 %), février (–23 %) et novembre (–20 %). Seuls quelques mois présentent des hausses marginales, comme septembre (+5 %), mais elles demeurent isolées. Enfin, en fin de siècle (2081–2100), les déficits atteignent leur intensité maximale, avec –34 % en avril, –30 % en janvier et novembre, et –21 % en décembre. Ces valeurs traduisent une perte structurelle sévère des précipitations au moment clé de la recharge hydrique.

Sur le plan saisonnier, plusieurs enseignements se dégagent :

- Un effondrement hivernal et printanier, particulièrement marqué en janvier, février, avril et mai, compromettant gravement la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité en eau pour les cultures.
- Une relative stabilité estivale, où les diminutions restent modérées (–1 à –6 %), mais sans réelle compensation.
- Un automne durablement déficitaire, avec des baisses récurrentes atteignant –30 % en novembre à la fin du siècle.

Dans l'ensemble, le scénario SSP5-8.5 suggère un futur hydrologique alarmant pour la zone d'étude. La réduction marquée des précipitations hivernales et printanières, conjuguée à une compensation estivale quasi inexistante, renforcerait considérablement les risques de sécheresse chronique, stress hydrique structurel et instabilité de la production agricole. Ces tendances confirment que l'élévation des émissions de gaz à effet de serre entraîne une dégradation croissante des conditions pluviométriques, amplifiant les pressions déjà identifiées sous les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP3-7.0.

2.5. Comparaison intégrée des scénarios SSP

L'analyse comparative des quatre scénarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5) met en évidence une gradation nette des impacts pluviométriques en fonction de l'intensité des émissions de gaz à effet de serre. Plus le scénario est associé à un niveau d'émissions élevé, plus les déficits en précipitations sont marqués et persistants, traduisant un lien direct entre trajectoires climatiques globales et pressions hydriques locales.

2.5.1. Tendances générales

Sous SSP1-2.6, les réductions sont déjà visibles, mais elles demeurent relativement modérées, avec quelques compensations au printemps et en été. Dans SSP2-4.5, la baisse devient plus prononcée, notamment en hiver et en automne, tandis que les augmentations ponctuelles en février, mai et juin révèlent une redistribution saisonnière plus marquée. En revanche, SSP3-7.0 accentue fortement les déficits, particulièrement en hiver et au printemps, avec des valeurs atteignant –31 % en avril, traduisant une tendance structurelle à la sécheresse. Enfin, SSP5-8.5 représente la situation la plus critique : les baisses atteignent –34 % en avril et –30 % en janvier et novembre, confirmant un effondrement pluviométrique sévère et durable.

2.5.2. Analyse saisonnière

Trois dynamiques saisonnières principales se dégagent de l'analyse des projections de précipitations à l'horizon 2100 (Figure 14). En hiver, une diminution progressive mais généralisée est observée dans l'ensemble des scénarios, atteignant des niveaux particulièrement extrêmes sous SSP3-7.0 et SSP5-8.5, avec des pertes pouvant atteindre -30 %. Au printemps, les évolutions sont plus contrastées : une certaine variabilité est relevée, avec quelques augmentations ponctuelles en mai sous les scénarios SSP1-2.6 et SSP2-4.5. Cependant, une chute marquée des précipitations est projetée en avril dans les scénarios à fortes émissions, atteignant jusqu'à -34 % sous SSP5-8.5. En été, la tendance générale est à la stabilisation, voire à de légères hausses en juin et juillet dans les scénarios modérés, mais ces augmentations restent insuffisantes pour compenser les déficits cumulés, notamment dans les scénarios sévères. Enfin, l'automne est caractérisé par une dégradation persistante des précipitations, avec un déficit quasi systématique au mois de novembre, culminant à -30 % sous SSP5-8.5.

Ces dynamiques traduisent une redistribution défavorable du régime pluviométrique. La diminution des apports en hiver et au printemps, qui jouent un rôle crucial dans la recharge des nappes phréatiques et le développement des cultures d'hiver, constitue une source majeure d'inquiétude. En parallèle, les légères hausses estivales projetées, bien que présentes sous certains scénarios modérés, s'avèrent peu efficaces sur le plan hydrologique et agronomique, en raison de l'évapotranspiration accrue en cette période. Sous les scénarios intermédiaires (SSP1-2.6 et SSP2-4.5), cette redistribution reste partiellement compensée par des augmentations localisées. En revanche, les scénarios à fortes émissions (SSP3-7.0 et SSP5-8.5) aboutissent à des déficits pluviométriques structurels, renforçant les risques de sécheresse chronique, de stress hydrique et d'instabilité de la production agricole.

De manière synthétique, les résultats mettent en évidence la vulnérabilité marquée de la zone d'étude face aux changements futurs du régime des précipitations, et ce, même dans le cadre du scénario le plus optimiste. Le passage progressif d'un scénario atténué (SSP1-2.6) à un scénario extrême (SSP5-8.5) illustre une amplification claire et systématique des déficits hydriques. Ces observations confirment que les trajectoires futures d'émissions conditionneront directement, et de manière déterminante, l'intensité des impacts hydrologiques et agricoles à l'échelle locale.

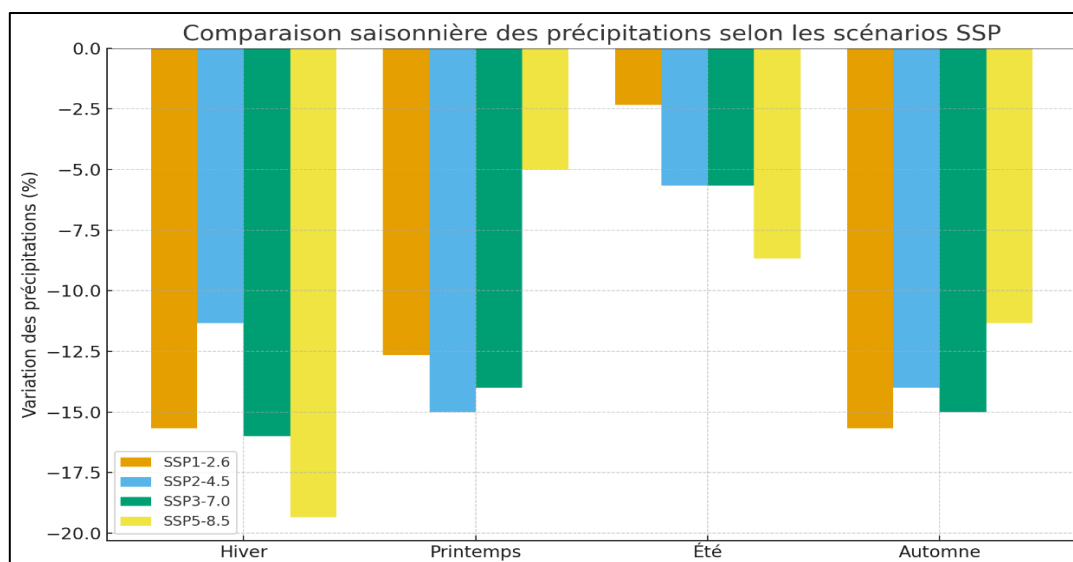


Figure 14. Les variations saisonnières des précipitations de la période 2081-2100, pour les quatre scénarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5). Chaque barre représente la moyenne des anomalies (%) par saison.

2.6. Discussion générale sur l'évolution future des précipitations et températures

Les résultats des projections climatiques, issues du modèle CMCC-ESM2, révèlent une dynamique contrastée de l'évolution des précipitations et des températures au XXI^e siècle, particulièrement marquée dans les régions semi-arides méditerranéennes. Cette tendance s'inscrit dans la continuité des conclusions du GIEC (IPCC, 2021), avec une "sécherification" progressive en hiver et au printemps, périodes cruciales tant pour la recharge hydrique que pour le développement des cultures pluviales, et des augmentations ponctuelles de précipitations en été, dont l'effet bénéfique reste limité dans un contexte de réchauffement et d'évapotranspiration accrue (Chourghal, 2023).

La baisse des précipitations est directement proportionnelle à l'intensité des scénarios socio-économiques (SSP). À l'horizon 2081-2100, les déficits pluviométriques s'échelonnent de -1,4 % (SSP1-2.6) à -3,2 % (SSP5-8.5), avec des chutes mensuelles pouvant atteindre -30 mm. Les mois de janvier et avril, avec des diminutions allant jusqu'à -30 % et -34 % respectivement sous SSP5-8.5, apparaissent comme les plus critiques, compromettant à la fois la recharge des nappes et le rendement des cultures (Sahabi-Abed, 2023). Ces pertes sont partiellement compensées par des hausses ponctuelles en juin (+14 % sous SSP1-2.6), mais insuffisantes pour inverser la tendance générale à la sécherification.

En parallèle, les projections de températures indiquent une hausse continue des températures maximales et minimales, tous scénarios confondus, avec une intensité plus marquée en été

(Chetioui & Bouregaa, 2024). Le scénario SSP5-8.5, en particulier, suggère une escalade thermique préoccupante, notamment durant la période estivale, accentuant le stress hydrique et thermique sur les cultures. L'automne connaît une progression plus modérée des températures, mais reste impacté par une baisse persistante des précipitations (jusqu'à -20 % en novembre).

Les implications de ces changements sont multiples. Sur le plan agricole, les déficits hydriques printaniers risquent d'entraîner une baisse des rendements pouvant atteindre -15 % pour des cultures sensibles comme le maïs ou le blé (Belazreg, 2023). Le mois de mai, plus chaud et plus sec, exacerbera les besoins en irrigation, accentuant la pression sur les ressources hydriques (Chourghal, 2023). Les ressources en eau, en effet, subissent déjà une diminution des écoulements de surface et de la recharge des nappes phréatiques, estimée entre 5 et 10 % par décennie. Ces évolutions sont particulièrement préoccupantes dans les zones où le stress hydrique est structurel (Sahabi-Abed, 2023).

Les écosystèmes naturels ne sont pas en reste. La multiplication des épisodes de sécheresse, combinée à des températures extrêmes, accroît le risque de mortalité forestière estivale, limitant les capacités de résilience des espèces ligneuses face à la baisse de disponibilité en eau (IPCC, 2021).

Toutefois, des marges d'adaptation existent, notamment sous le scénario SSP1-2.6, où les pertes pluviométriques restent modérées ($< -0,25$ mm/mois). Cela ouvre la voie à des stratégies d'adaptation telles que l'optimisation des systèmes d'irrigation, la gestion raisonnée des infrastructures hydrauliques, ou encore la diversification culturelle (Belazreg, 2023). La mise en œuvre de ces stratégies nécessitera une anticipation fine, fondée sur des outils robustes de modélisation. Il convient, à cet égard, de souligner les limites du modèle CMCC-ESM2, notamment son biais négatif de -8 % dans la reproduction de la variabilité interannuelle des précipitations. Pour affiner les prévisions, le recours à des approches multi-modèles et le couplage avec des modèles hydrologiques tels que SWAT est fortement recommandé (Chetioui & Bouregaa, 2024).

En somme, la région d'étude fait face à un avenir climatique marqué par un double stress : hydrique et thermique. Si le scénario SSP5-8.5 dessine une trajectoire de vulnérabilité critique, SSP1-2.6 laisse entrevoir des opportunités d'adaptation, à condition de mettre en place des politiques intégrées, proactives et fondées sur la science (Belazreg, 2023 ; Chourghal, 2023).

Tableau 7. Résultats des projections des changements des précipitations mensuelles pour la zone d'étude

Scenarios	Periode	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SSP126	2021-2040	-31%	-2%	-7%	-22%	-9%	-3%	0%	-4%	-7%	-18%	-22%	-14%
	2041-2060	-20%	-15%	-8%	-16%	-14%	14%	-3%	-6%	-1%	-13%	-27%	-13%
	2061-2080	-13%	-18%	-4%	-20%	0%	11%	1%	-7%	-2%	3%	-15%	-16%
	2081-2100	-11%	5%	-3%	-25%	5%	6%	1%	0%	0%	-2%	-22%	-20%
SSP245	2021-2040	-15%	-2%	-3%	-22%	-20%	-9%	-2%	-6%	-8%	-16%	-18%	-17%
	2041-2060	-27%	7%	-2%	-16%	-16%	9%	1%	-5%	-2%	-6%	-16%	-24%
	2061-2080	-7%	-16%	-6%	-18%	10%	5%	0%	-4%	4%	-6%	-25%	-13%
	2081-2100	-16%	-14%	-4%	-23%	-14%	-7%	0%	-5%	-16%	-2%	-18%	-20%
SSP370	2021-2040	-23%	-14%	-9%	-19%	-14%	-14%	1%	-4%	-8%	-14%	-23%	-11%
	2041-2060	-16%	-6%	-4%	-22%	-5%	5%	1%	-9%	-5%	-6%	-16%	-9%
	2061-2080	-28%	-16%	-15%	-31%	-16%	-5%	-3%	-5%	2%	-12%	-17%	-12%
	2081-2100	-24%	-13%	-12%	-28%	-16%	-2%	-3%	-9%	-1%	0%	-20%	-12%
SSP585	2021-2040	-20%	-16%	12%	-17%	-10%	-10%	-4%	-12%	-9%	-14%	-11%	-22%
	2041-2060	-20%	-13%	-15%	-25%	-14%	-14%	-5%	-14%	-4%	-8%	-25%	-18%
	2061-2080	-16%	-23%	-9%	-32%	-11%	-4%	-1%	-4%	5%	-6%	-20%	-13%
	2081-2100	-30%	-14%	-12%	-34%	-15%	-9%	-6%	-6%	-4%	-9%	-30%	-21%

Note : le tableau présente la variation en pourcentage des précipitations mensuelles pour la zone d'étude, projetée sur quatre périodes futures (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, et 2081-2100) selon quatre scénarios SSP (SSP126, SSP245, SSP370, et SSP585). Chaque ligne représente une période et un scénario spécifiques, détaillant l'évolution prévue des précipitations pour les mois allant de janvier (J) à décembre (D). Les valeurs négatives indiquent une diminution, tandis que les valeurs positives représentent une augmentation des précipitations. Le tableau met en évidence les variations saisonnières potentielles et les tendances à long terme.

3. Évapotranspiration de référence : analyses actuelles et perspectives futures

Le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0) a été réalisé selon la méthode Penman-Monteith, en utilisant des données climatiques simulées par un Modèle de Circulation Générale (GCM). Ce calcul repose principalement sur des paramètres météorologiques, où les tendances de température et l'humidité de l'air jouent un rôle déterminant (Yalcin, 2024 ; Ishaque et al., 2023 ; Gabr, 2022).

3.1. Analyse de la période de base (1970–2000) de l'évapotranspiration de référence (ET_0)

L'analyse statistique de l'évapotranspiration de référence (ET_0) pour la période de référence, calculée sur 43 stations météorologiques représentatives de la région étudiée, met en évidence un cycle saisonnier marqué et une forte variabilité spatiale. Les valeurs mensuelles moyennes indiquent une demande atmosphérique en eau relativement faible durant l'hiver, suivie d'une augmentation progressive au printemps, pour atteindre un maximum durant la saison estivale avant de décroître en automne.

Durant la saison hivernale (décembre à février), l' ET_0 se maintient à des niveaux faibles, avec des valeurs moyennes comprises entre 1,80 et 2,25 mm/jour. Cette faiblesse est cohérente avec les conditions climatiques hivernales caractérisées par des températures basses, une radiation solaire réduite et une durée d'ensoleillement limitée. Le minimum hivernal observé atteint 1,41 mm/jour en janvier, tandis que les valeurs maximales relevées dans certaines stations s'élèvent jusqu'à 3,10 mm/jour, traduisant une variabilité spatiale non négligeable même durant la période la moins évaporative.

Au printemps, une nette augmentation de l' ET_0 est enregistrée, traduisant la transition climatique vers des conditions plus chaudes et ensoleillées. Les moyennes mensuelles passent de 3,05 mm/jour en mars à environ 4,91 mm/jour en mai. Cette hausse rapide traduit l'accroissement progressif de la demande climatique en eau, période critique pour la croissance des cultures dans la région.

La saison estivale constitue la période de plus forte intensité évaporative, avec des valeurs moyennes comprises entre 5,96 mm/jour en juin et un maximum de 6,61 mm/jour en juillet, avant un léger repli à 6,27 mm/jour en août. Les valeurs extrêmes atteignent 8,40 mm/jour en juillet, ce qui souligne l'importance des besoins hydriques durant cette saison. Cette dynamique est directement liée à l'élévation des températures, au fort rayonnement solaire et à la persistance de conditions atmosphériques sèches.

En automne, une diminution progressive de l' ET_0 est observée, passant de 4,91 mm/jour en septembre à 2,35 mm/jour en novembre. Cette baisse s'explique par la réduction de la température et de l'ensoleillement, amorçant le retour à des conditions évaporatives modérées en hiver. Néanmoins, une variabilité spatiale subsiste, avec des maxima atteignant près de 4,0 mm/jour en novembre, contre un minimum de 1,90 mm/jour.

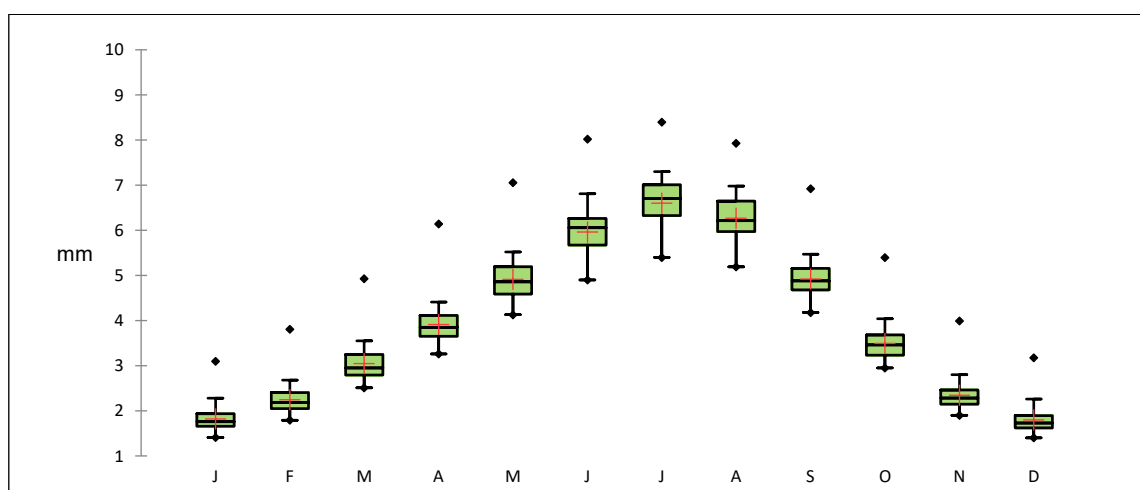


Figure 15. *l'évapotranspiration de référence de la période de base (1970–2000)*

Ainsi, la période de référence met en évidence un cycle annuel typique de climat semi-aride à forte saisonnalité, où l'évapotranspiration est dominée par les conditions estivales. La variabilité interstationnelle, illustrée par les écarts entre les valeurs minimales et maximales (jusqu'à 3 mm/jour en été), traduit l'hétérogénéité spatiale du territoire étudié, probablement liée aux contrastes topographiques, altitudinaux et de continentalité. Cette base de référence constitue un point d'ancrage essentiel pour l'évaluation des évolutions futures de l' ET_0 sous l'effet du changement climatique.

3.2. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP1-2.6

Les projections de l' ET_0 issues du scénario SSP1-2.6 montrent la persistance d'un cycle saisonnier similaire à celui observé durant la période de référence, marqué par des valeurs minimales en hiver et maximales en été. Toutefois, une tendance générale à l'augmentation de l'évapotranspiration est observée tout au long du XXI^e siècle, avec une intensité variable selon les saisons et les horizons temporels.

Durant la saison hivernale, les valeurs d' ET_0 demeurent faibles, oscillant entre 1,90 et 2,40 mm/jour en moyenne selon les mois. L'évolution future montre une légère hausse par rapport à la période de référence, de l'ordre de +0,1 à +0,15 mm/jour d'ici la fin du siècle. Cette augmentation modeste s'explique par le réchauffement hivernal attendu dans la région, bien que l'impact sur la demande évaporative reste limité en raison de la faible radiation solaire et de la durée réduite du jour.

Au printemps, une élévation progressive des valeurs est constatée, avec des moyennes mensuelles qui atteignent environ 3,2 mm/jour en mars et dépassent 5,1 mm/jour en mai à l'horizon 2081–2100. Par rapport à la période de référence, les hausses sont de l'ordre de +0,1 à +0,2 mm/jour. Cette augmentation, bien que modérée, peut avoir des conséquences notables sur les besoins en eau des cultures de printemps, période sensible pour le développement végétatif.

La saison estivale demeure la plus critique, concentrant les valeurs maximales d' ET_0 . Les moyennes projetées varient entre 6,1 et 6,8 mm/jour selon les horizons, avec un pic estival autour de juillet. Par rapport à la période de référence (6,61 mm/jour en juillet), les projections indiquent une augmentation atteignant +0,15 à +0,20 mm/jour d'ici 2100, soit une hausse relative de 2 à 3 %. Certaines stations extrêmes affichent des maxima supérieurs à 8,6 mm/jour, traduisant une demande atmosphérique très élevée et une accentuation des stress hydriques potentiels. L'été constitue donc la période où l'impact du changement climatique, même sous un scénario de faibles émissions, se manifeste le plus clairement.

En automne, l'évolution suit une dynamique intermédiaire. Les valeurs mensuelles passent d'environ 5,0 mm/jour en septembre à 2,5 mm/jour en novembre à l'horizon 2081–2100. Les hausses projetées par rapport au climat de référence sont comprises entre +0,1 et +0,2 mm/jour, traduisant une prolongation légère mais significative des conditions évaporatives de fin d'été.

Globalement, sous le scénario SSP1-2.6, les projections futures mettent en évidence une hausse modérée et progressive de l' ET_0 à l'échelle de la région. L'augmentation reste contenue en comparaison avec les scénarios à fortes émissions (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5), ce qui traduit l'efficacité de la trajectoire de stabilisation climatique. Toutefois, même limitée, cette augmentation se concentre durant les saisons de forte demande en eau (été et début d'automne), périodes déjà critiques pour la gestion des ressources hydriques. Enfin, la variabilité spatiale demeure importante entre stations, comme l'illustrent les écarts entre valeurs minimales et maximales, ce qui implique la nécessité d'adaptations différenciées selon les contextes locaux (plaines intérieures, zones côtières ou régions d'altitude).

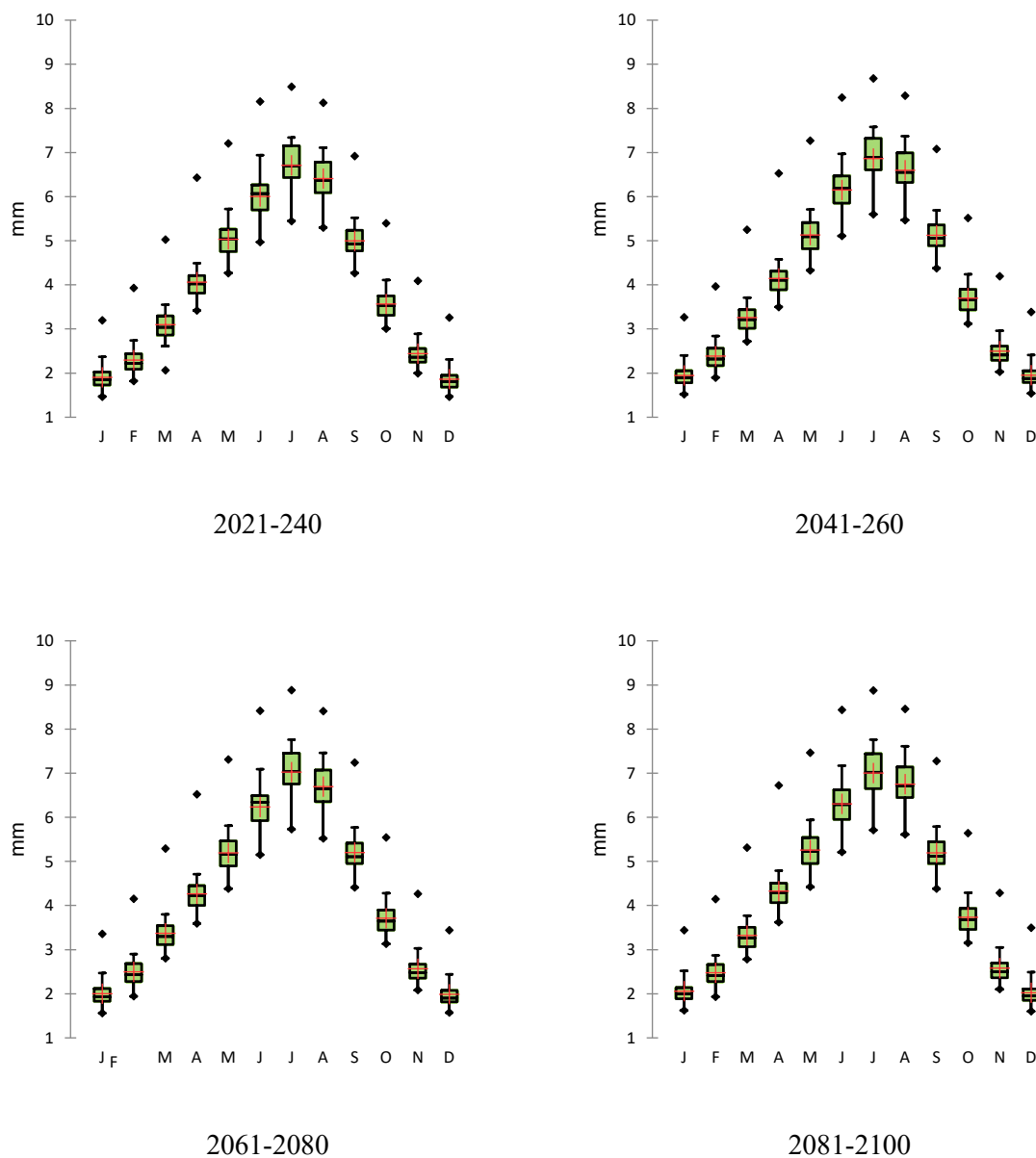


Figure 16. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP1-2.6

3.3. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP2-4.5

Les projections futures de l'évapotranspiration de référence (ET₀) selon le scénario intermédiaire SSP2-4.5 indiquent une intensification progressive de la demande évaporative au cours du XXI^e siècle. Bien que le cycle saisonnier conserve les mêmes caractéristiques que celui de la période de référence — avec des minima en hiver et des maxima en été — l'amplitude annuelle tend à s'accroître sous l'effet du réchauffement.

Durant l'hiver (décembre–février), les valeurs moyennes d' ET_0 se situent entre 1,95 et 2,40 mm/jour au début de la période de projection, puis augmentent légèrement pour atteindre 2,00 à 2,54 mm/jour à la fin du siècle. Comparativement à la période de référence, la hausse est comprise entre +0,15 et +0,25 mm/jour, traduisant un accroissement de la demande atmosphérique même dans la saison la moins évaporative. Cette évolution reste toutefois limitée, confirmant le rôle atténuateur de la faible radiation et de la durée d'ensoleillement hivernale.

Au printemps, la progression de l' ET_0 est plus marquée. Les moyennes mensuelles atteignent 3,26 mm/jour en mars et dépassent 5,13 mm/jour en mai au premier horizon (2021–2040). Ces valeurs s'élèvent ensuite jusqu'à 3,46 mm/jour en mars et 5,29 mm/jour en mai en fin de siècle. Les augmentations sont de l'ordre de +0,2 à +0,3 mm/jour par rapport à la baseline, soit un gain relatif de 5 à 7 %, ce qui pourrait renforcer les besoins hydriques des cultures de printemps.

L'été demeure la période de forte contrainte, avec des valeurs moyennes d' ET_0 qui varient de 6,15 mm/jour en juin à un maximum de 6,92–7,06 mm/jour en juillet, avant un léger recul en août (6,60–6,84 mm/jour). Par rapport à la période de référence (6,61 mm/jour en juillet), les projections indiquent une hausse comprise entre +0,25 et +0,45 mm/jour à l'horizon 2100, soit une augmentation relative de 4 à 6 %. Les valeurs maximales relevées dans certaines stations atteignent 8,8 mm/jour, accentuant la pression estivale sur les ressources en eau.

En automne, les projections montrent une augmentation progressive de l' ET_0 . En septembre, les valeurs moyennes passent de 4,92 mm/jour (baseline) à environ 5,22 mm/jour en fin de siècle. En novembre, elles atteignent 2,54 mm/jour contre 2,35 mm/jour en référence, soit un gain de +0,2 mm/jour. Cela traduit un prolongement des conditions évaporatives élevées après l'été, ce qui pourrait retarder la recharge hydrique des sols.

En termes de variabilité spatiale l'écart entre les valeurs minimales et maximales reste marqué dans toutes les saisons. En juillet, par exemple, les minima se situent autour de 5,60 mm/jour alors que les maxima atteignent 8,85 mm/jour. Ces différences, supérieures à 3 mm/jour, témoignent d'une forte hétérogénéité spatiale entre stations, attribuable aux contrastes de relief, de continentalité et de proximité maritime.

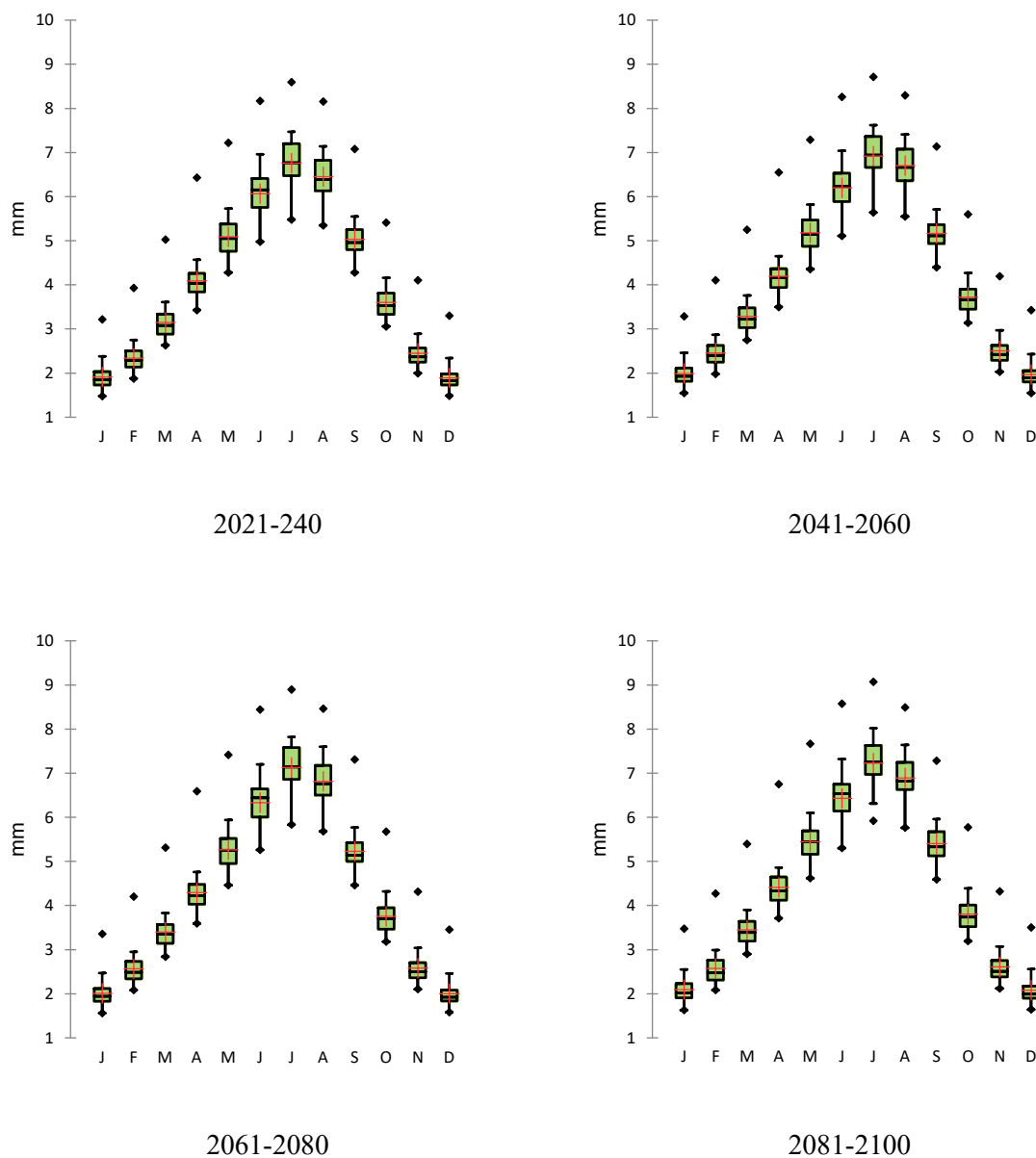


Figure 17. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP2-4.5

Le scénario SSP2-4.5 révèle une hausse modérée mais plus accentuée que dans le SSP1-2.6. Cette augmentation touche toutes les saisons, mais elle est plus prononcée en été et au printemps, périodes critiques pour la demande agricole en eau. À l'horizon 2100, les hausses moyennes sont de l'ordre de +0,2 à +0,4 mm/jour selon les mois, correspondant à une augmentation relative de 5 à 7 % par rapport à la période de référence. Cette intensification de l'évapotranspiration, combinée à la variabilité spatiale déjà existante, accentuera les pressions sur les ressources hydriques et la gestion de l'irrigation dans la région.

3.4. Projections futures de l'évapotranspiration de référence selon le scénario SSP3-7.0

Le scénario SSP3-7.0, caractérisé par une trajectoire de développement fragmentée et des émissions élevées de gaz à effet de serre, projette une intensification marquée de l'évapotranspiration de référence (ET_0) au cours du XXI^e siècle. Les résultats, établis sur la base de 43 séries temporelles et couvrant quatre horizons temporels (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 et 2081–2100), traduisent une augmentation progressive et soutenue de la demande atmosphérique en eau.

La répartition mensuelle de l' ET_0 conserve une saisonnalité marquée, similaire à celle observée au cours de la période de référence. Les valeurs demeurent faibles en hiver (1,9 à 2,5 mm/jour entre décembre et février), augmentent progressivement au printemps (3,3 à 5,2 mm/jour entre mars et mai), puis atteignent un maximum estival dépassant 7 mm/jour en juillet, avant de décliner graduellement à l'automne (2,6 à 3,8 mm/jour entre octobre et novembre). Cette dynamique confirme le rôle déterminant de la hausse des températures et de la radiation solaire dans le renforcement de la demande évaporative.

Comparativement à la période de référence, les projections révèlent une hausse systématique des valeurs mensuelles pour l'ensemble des horizons temporels. L'augmentation devient particulièrement prononcée entre mai et septembre, période critique pour la production agricole. Ainsi, les moyennes mensuelles atteignent respectivement 5,19 mm/jour en mai, 6,23 mm/jour en juin et 7,02 mm/jour en juillet, traduisant une intensification du stress hydrique estival. Cette élévation n'est pas seulement ponctuelle, mais s'inscrit dans une tendance de long terme qui se renforce au fil des décennies.

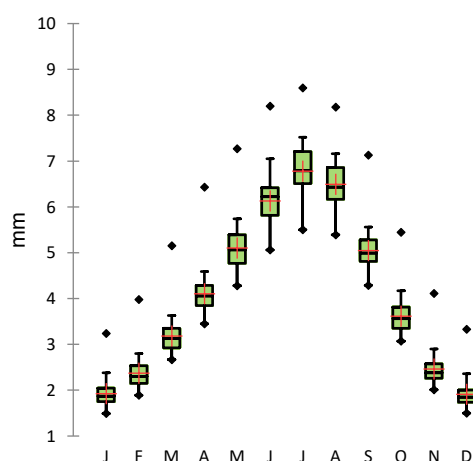
En termes de variabilité interannuelle Les valeurs minimales et maximales mettent en évidence une variabilité interannuelle accrue, susceptible de générer des épisodes extrêmes. En été, l' ET_0 varie par exemple de 5,15 à 8,41 mm/jour en juin et de 5,73 à 8,88 mm/jour en juillet. À l'horizon 2081–2100, certains épisodes extrêmes pourraient dépasser 9 mm/jour, ce qui illustre la probabilité croissante de périodes de forte intensité évaporative, avec des conséquences notables sur la disponibilité en eau.

L'analyse diachronique des précipitations moyennes journalières met en évidence une trajectoire ascendante marquée sur l'ensemble de la période étudiée. Durant la période 2021–2040, l'augmentation reste encore modérée, bien que déjà perceptible, notamment au printemps et en été. Ce signal initial, bien que contenu, indique une dynamique de changement progressive.

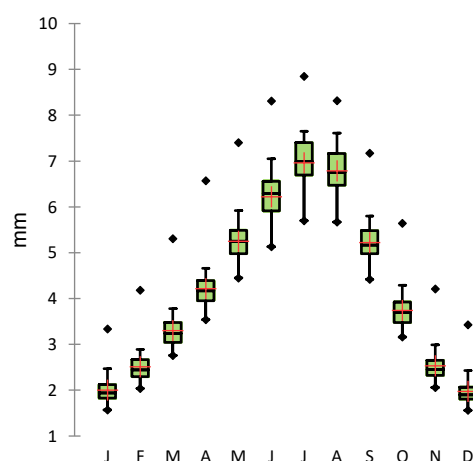
Entre 2041 et 2060, la tendance s'intensifie, en particulier durant les mois de juin et juillet, traduisant une élévation plus rapide des précipitations estivales. Cette phase intermédiaire marque une transition vers un régime hydrique plus contraignant, avec des précipitations moyennes en nette hausse.

À l'horizon 2061–2080, les niveaux estivaux dépassent régulièrement 7 mm/jour, ce qui contribue à accroître la pression sur les systèmes agricoles déjà fragilisés par l'élévation des températures et l'augmentation de l'évapotranspiration. Cette combinaison de facteurs hydriques et thermiques exacerbe les risques de stress agro-environnemental.

Enfin, la période 2081–2100 se caractérise par des valeurs extrêmes, avec des précipitations journalières estivales excédant fréquemment 9 mm/jour. Ces niveaux traduisent l'installation durable d'un climat marqué par des contraintes hydriques sévères, posant des défis majeurs pour la gestion des ressources en eau et la résilience des agroécosystèmes.



2021-240



2041-2060

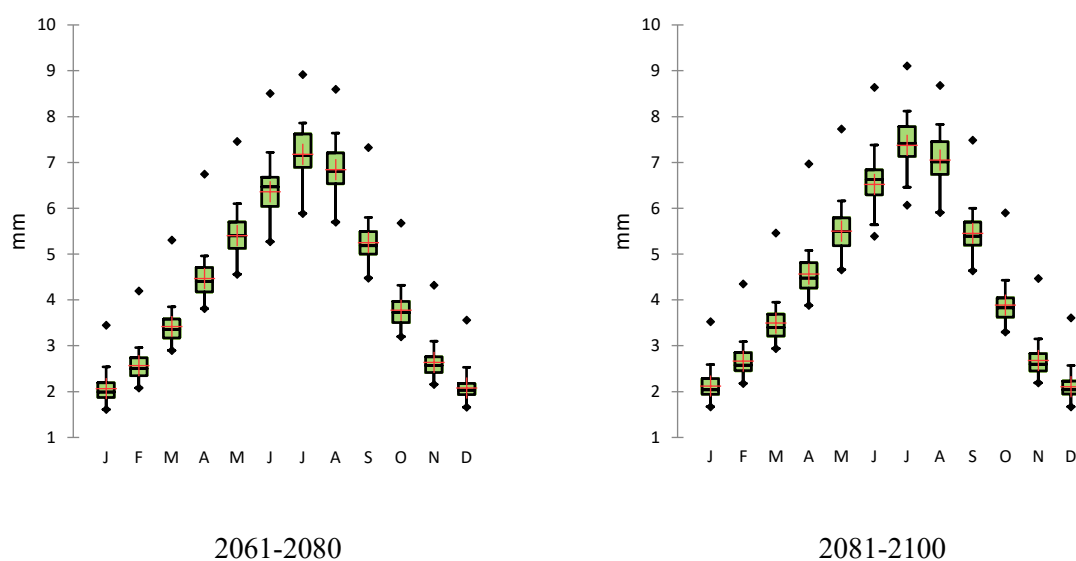


Figure 18. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP3-7.0

3.5. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP5-8.5

Le scénario SSP5-8.5, représentant une trajectoire à fortes émissions de gaz à effet de serre et un réchauffement global accentué, projette une augmentation marquée de l'évapotranspiration de référence (ET₀) tout au long du XXI^e siècle. Les données issues des 43 stations étudiées révèlent une intensification régulière de la demande atmosphérique en eau, avec des maxima nettement supérieurs à ceux des scénarios plus modérés.

Le cycle annuel de l'évapotranspiration de référence (ET₀) conserve une structure saisonnière similaire à celle de la période de référence, avec des minima en hiver et des maxima en été. Toutefois, les amplitudes saisonnières sont nettement amplifiées sous l'effet du réchauffement climatique, traduisant une augmentation significative de la demande atmosphérique en eau tout au long de l'année.

En hiver (décembre à février), les valeurs moyennes d'ET₀, qui oscillaient entre 2,05 et 2,47 mm/jour sur la période 2021–2040, augmentent pour atteindre 2,23 à 2,88 mm/jour à l'horizon 2081–2100. L'accroissement par rapport à la période de référence est de l'ordre de +0,2 à +0,4 mm/jour, soit une hausse relative comprise entre 10 et 15 %. Bien que l'hiver demeure la saison la moins évaporative, cette évolution reflète l'impact direct du réchauffement hivernal sur les processus d'évapotranspiration.

Au printemps (mars à mai), les moyennes mensuelles d' ET_0 atteignent 3,32 à 5,26 mm/jour en début de période, pour s'élever à 3,70 à 5,70 mm/jour en fin de siècle. Par rapport à la période de référence, les hausses excèdent +0,4 mm/jour, mettant en évidence une intensification notable de la demande évaporative dès le début de la saison culturale, ce qui pourrait affecter la dynamique de croissance des cultures sensibles à l'humidité du sol.

Durant l'été (juin à août), la saison estivale enregistre les valeurs les plus élevées ainsi que l'évolution la plus marquée. Les projections indiquent des moyennes comprises entre 6,30 et 7,00 mm/jour pour la période 2021–2040, tandis qu'à l'horizon 2100, elles dépassent 7,60 mm/jour en juillet. Les valeurs extrêmes franchissent le seuil de 9,5 mm/jour, témoignant d'une pression hydrique sans précédent sur les agroécosystèmes. Par rapport à la valeur de référence de 6,61 mm/jour en juillet, l'augmentation varie de +0,7 à +1,0 mm/jour, soit une intensification relative de 12 à 15 %.

Enfin, en automne (septembre à novembre), une élévation progressive des niveaux d' ET_0 est également observée. Les moyennes passent de 5,19 à 2,57 mm/jour au début du siècle à environ 5,70 à 2,88 mm/jour en fin de siècle. Cette tendance indique une prolongation des conditions évaporatives élevées au-delà de la période estivale, ce qui pourrait retarder la recharge hydrique des sols et limiter la récupération des ressources en eau avant l'hiver.

L'analyse des extrêmes et de la variabilité spatiale met en évidence une accentuation marquée de la variabilité interstationnelle, en particulier durant la saison estivale. À l'horizon 2081–2100, les écarts entre stations dépassent 3 mm/jour en juillet, avec des valeurs minimales avoisinant 6,2 mm/jour et des maxima atteignant jusqu'à 9,5 mm/jour. Cette hétérogénéité spatiale reflète à la fois les contrastes topographiques et climatiques propres à la région étudiée, mais elle traduit également un risque accru d'occurrence de pics extrêmes localisés, susceptibles d'aggraver considérablement les épisodes de stress hydrique.

Sur le plan temporel, la trajectoire projetée révèle une tendance haussière continue tout au long du XXI^e siècle. Entre 2021 et 2040, l'augmentation reste modérée, bien que déjà significative, en particulier au printemps et en été. Cette phase initiale laisse place à un renforcement notable des valeurs estivales au cours de la période 2041–2060, avec un pic moyen atteignant 7,22 mm/jour en juillet. L'intensification se poursuit durant la période 2061–2080, marquée par le franchissement du seuil de 7,6 mm/jour en moyenne estivale, accompagné d'un nombre croissant d'épisodes extrêmes. Enfin, la période 2081–2100 se distingue par une intensification maximale, avec des moyennes estivales excédant fréquemment 7,6 à 7,8 mm/jour et des extrêmes dépassant 9,5 mm/jour.

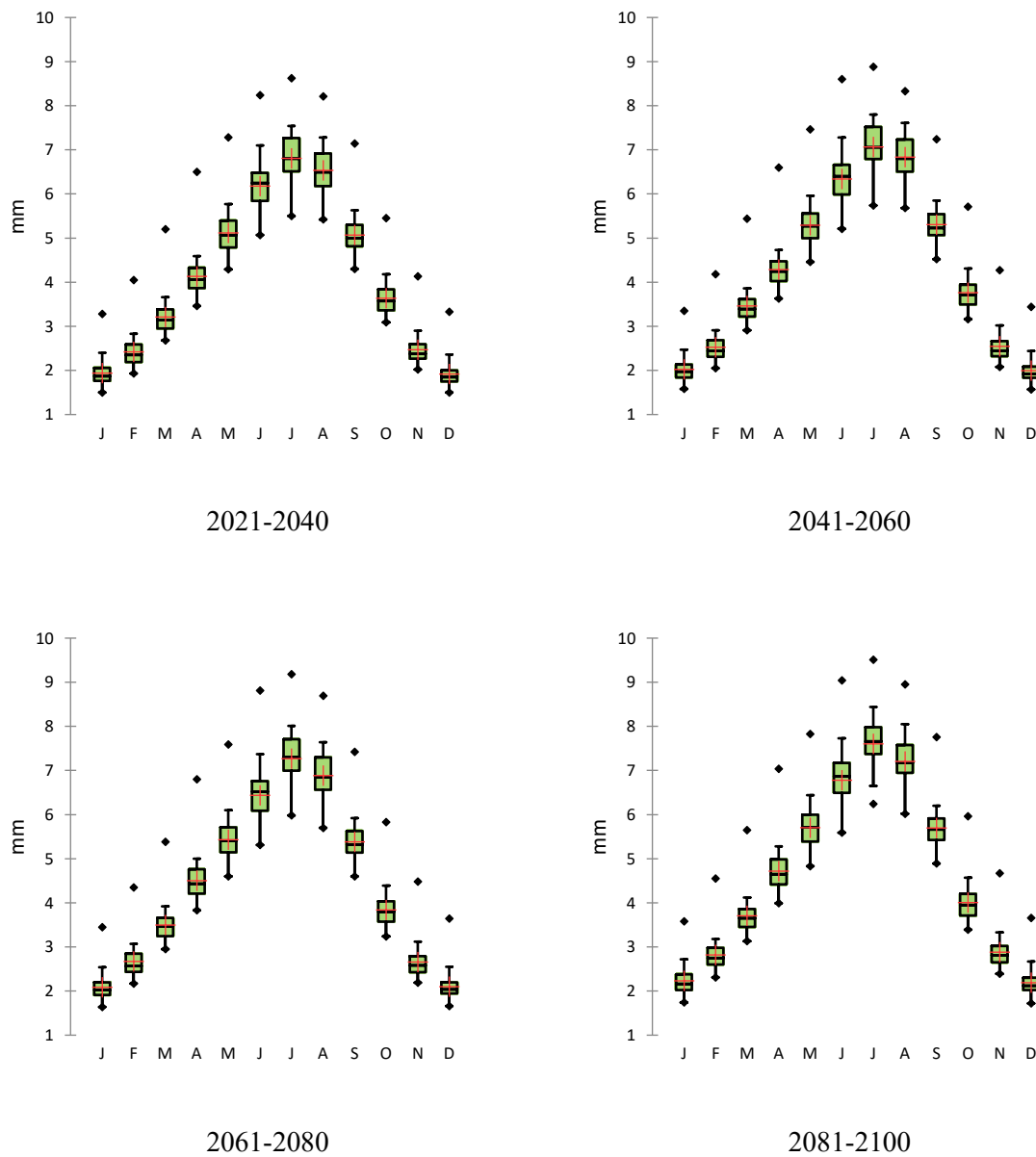


Figure 19. Projections futures de l'évapotranspiration de référence sous le scénario SSP5-8.5

Dans ce contexte, le scénario SSP5-8.5 projette une aggravation nette et durable de la demande évaporative à l'échelle régionale. Cette intensification se concentre majoritairement sur la saison estivale, avec une hausse relative supérieure à 15 % par rapport à la période de référence. Les augmentations observées au printemps et à l'automne, bien que moins marquées, contribuent à allonger la période annuelle de contrainte hydrique, exerçant une pression croissante sur les systèmes agricoles.

Ces résultats soulignent la vulnérabilité croissante des ressources en eau et de la production agricole dans un contexte de réchauffement climatique non maîtrisé. Ils mettent en lumière la nécessité de développer et de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation robustes, incluant l'optimisation des pratiques d'irrigation, la diversification des cultures, ainsi qu'une planification agro-hydrologique anticipative, afin d'atténuer les impacts de ce scénario de réchauffement extrême.

3.6. Discussion et analyse comparative des scénarios de projection de l'ET₀

L'analyse des projections climatiques met en évidence une augmentation progressive de l'évapotranspiration de référence (ET₀) au cours du XXI^e siècle (Tableau 8), cette tendance étant directement proportionnelle à l'intensité des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Le scénario le plus optimiste, SSP1-2.6, présente une évolution relativement modérée, tandis que le scénario pessimiste SSP5-8.5 prévoit une intensification marquée, particulièrement durant la saison estivale, exacerbant ainsi les déficits hydriques déjà préoccupants. L'ET₀ annuelle moyenne, qui s'établit actuellement à environ 3,95 mm/jour, pourrait connaître une hausse de l'ordre de +17,3 % d'ici 2100 sous SSP5-8.5, contre +7,7 % sous SSP1-2.6 (Saadi et al., 2015 ; Sahabi-Abed, 2023).

Cette augmentation significative de l'ET₀ traduit une pression accrue sur les ressources en eau dédiées à l'agriculture, soulignant la nécessité d'adaptations urgentes et efficaces des pratiques d'irrigation afin d'assurer la durabilité des systèmes cultureux. En effet, l'écart croissant entre les scénarios illustre l'influence déterminante des politiques climatiques sur la gestion future de l'eau et des ressources agricoles (Kourat et al., 2021).

Par ailleurs, la variation mensuelle de l'ET₀ révèle l'importance cruciale du calendrier cultural, notamment la date de semis, qui impacte directement les besoins en eau des cultures (Crop Water Requirements, CWR) selon les espèces végétales concernées. Cette observation suggère que l'optimisation des calendriers de semis pourrait constituer une stratégie d'adaptation clé pour atténuer les effets négatifs liés à l'augmentation de l'évapotranspiration dans un contexte de changement climatique (Chowdhury & Al-Zahrani, 2013). Une gestion ajustée des pratiques agricoles, combinée à une meilleure planification des ressources hydriques, apparaît ainsi essentielle pour répondre aux défis posés par ces évolutions climatiques.

En résumé, les projections de l'ET₀ confirment une tendance généralisée à l'accroissement des besoins en eau des cultures, avec une intensification plus marquée sous les scénarios à fortes

émissions. Ces résultats corroborent les travaux antérieurs et invitent à renforcer les mesures d'adaptation sectorielles pour limiter les impacts négatifs sur l'agriculture méditerranéenne (Saadi et al., 2015 ; Sahabi-Abed, 2023 ; Kourat et al., 2021).

Tableau 8. Comparaison des moyennes saisonnières de l'ET₀ à l'horizon 2100

Saison	Période de Référence	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Hiver	2.0	2.2 (+0.2)	2.3 (+0.3)	2.4 (+0.4)	2.6 (+0.6)
Printemps	4.3	4.6 (+0.3)	4.7 (+0.4)	4.9 (+0.6)	5.2 (+0.9)
Été	6.6	6.8 (+0.2)	7.0 (+0.4)	7.3 (+0.7)	7.8 (+1.2)
Automne	3.9	4.1 (+0.2)	4.2 (+0.3)	4.4 (+0.5)	4.6 (+0.7)

*Note : Les valeurs entre parenthèses indiquent la différence par rapport à la période de référence.

4. Besoins en eau des cultures : diagnostic actuel et projections future

La Figure 20 illustre les résultats de simulation des besoins en eau des cultures pour les différents scénarios climatiques, mettant en évidence une tendance à la hausse constante. À partir du calcul de l'évapotranspiration des cultures (ET_c), qui combine l'évapotranspiration de référence (ET₀) avec les coefficients cultureux spécifiques, nos analyses révèlent une augmentation significative des besoins hydriques des cultures dans le futur.

La zone d'étude, qui s'étend sur environ 3,3 millions d'hectares selon les données du MADR (2019), présente des besoins en eau des cultures variant entre 427 mm et 693 mm selon les cultures et les zones, avec une moyenne de 560 mm pour l'ensemble du territoire. Ces résultats démontrent que l'évolution climatique entraînera une pression accrue sur les ressources en eau disponibles pour l'agriculture.

L'analyse des différents scénarios montre que cette augmentation des besoins en irrigation sera particulièrement marquée dans les décennies à venir, nécessitant une adaptation des systèmes de production agricole et une optimisation des pratiques d'irrigation pour maintenir les rendements tout en préservant les ressources hydriques. Ces projections soulignent l'importance cruciale de développer des stratégies de gestion de l'eau adaptatives face aux changements climatiques.

4.1. Analyse actuelle des besoins en eau des cultures

Plusieurs études ont documenté les besoins hydriques du blé dur dans différentes régions climatiques. Saadi et al. (2015) ont rapporté des valeurs allant de 330 mm pour les zones subhumides à 650 mm dans les régions semi-arides. Des observations similaires ont été enregistrées par Chennafi (2012) dans les Hauts Plateaux de Sétif, où les besoins en eau du blé dur variaient entre 608 et 666 mm. Plus récemment, Masia et al. (2021) ont projeté, pour les scénarios climatiques futurs (2036-2065), des besoins compris entre 400 et 500 mm selon les trajectoires RCP4.5 et RCP8.5. Ces différentes études convergent vers un constat unanime : l'eau constitue une ressource absolument indispensable à la culture du blé dur, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les stress hydriques risquent de s'accroître avec les changements climatiques. La variabilité des résultats reflète à la fois les différences méthodologiques et la diversité des contextes pédoclimatiques étudiés.

L'analyse spatiale révèle des disparités régionales marquées en matière de besoins en eau. Durant la période de référence, les régions du nord-ouest algérien présentent des demandes hydriques particulièrement élevées. En revanche, dans le centre-nord du pays, environ 62% de la zone d'étude enregistre des besoins hydriques compris entre 427 mm et 550 mm, tandis que les 38% restants affichent des valeurs plus importantes, variant de 570 mm à 629 mm. Cette répartition géographique met en évidence une hétérogénéité significative des besoins en irrigation à l'échelle régionale, reflétant les variations climatiques et pédologiques locales. Le gradient observé entre les différentes zones souligne l'importance d'une approche différenciée de la gestion des ressources en eau pour l'agriculture, particulièrement dans un contexte de changement climatique où ces disparités pourraient s'accroître.

4.2. Évaluation des impacts des scénarios climatiques sur les besoins en eau futurs

Dans les années à venir, particulièrement selon le scénario SSP1-2.6, nous anticipons une augmentation de 2,23 % des besoins en eau des cultures pour la période proche (2021-2040). Cette hausse correspond à un accroissement moyen de 120 m³ par hectare, se traduisant par une demande d'irrigation cumulée d'environ 396 millions de mètres cubes pour les 3,3 millions d'hectares étudiés. En conséquence, la superficie affichant des besoins en eau inférieurs à 550 mm devrait diminuer, passant de 76 % à 54 % de la superficie totale. Selon ce même scénario SSP1-2.6, les projections indiquent une augmentation supplémentaire des besoins en eau des cultures de 6,73 % à 7,67 % pour les périodes 2041-2060 et 2061-2080 respectivement, correspondant à des demandes d'irrigation moyennes de 377 m³ ha⁻¹ et 429 m³ ha⁻¹. Par conséquent, la proportion de terres présentant des besoins en eau inférieurs à 550 mm devrait

diminuer à 43 % puis 37 % de la superficie totale. D'ici 2100, avec une augmentation de 8,15 % des besoins en eau des cultures, la demande en eau d'irrigation devrait atteindre 456 m³/ha. Cela implique que les 3,3 millions d'hectares nécessiteront environ 1,5 milliard de mètres cubes d'eau d'irrigation. De plus, l'étendue des terres ayant des besoins en eau inférieurs à 550 mm devrait se réduire à un maximum de 34 % de la superficie totale.

Les projections climatiques pour la période 2021-2040, basées sur les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0, indiquent une augmentation des besoins en eau des cultures (BEC) comprise entre 2,83 % et 3,03 %. Cette tendance à l'augmentation devrait s'accroître progressivement au cours du siècle, avec des hausses projetées de 5,54 % à 5,89 % pour la période 2041-2060, puis de 8,41 % à 10,42 % entre 2061 et 2080. En fin de période (2081-2100), l'augmentation cumulée des BEC devrait atteindre 10,45 % à 13,00 % selon ces mêmes scénarios. Cette évolution entraînera une augmentation significative des besoins en irrigation, avec des demandes estimées à 585 m³ ha⁻¹ et 728 m³ ha⁻¹ respectivement. Parallèlement, la superficie des terres présentant des besoins hydriques inférieurs à 550 mm devrait se réduire considérablement, ne représentant plus que 17 % à 13 % de la superficie totale étudiée. Ces projections mettent en évidence une pression croissante sur les ressources en eau agricoles, particulièrement marquée dans le scénario SSP3-7.0, nécessitant des adaptations majeures des systèmes d'irrigation pour maintenir la productivité agricole.

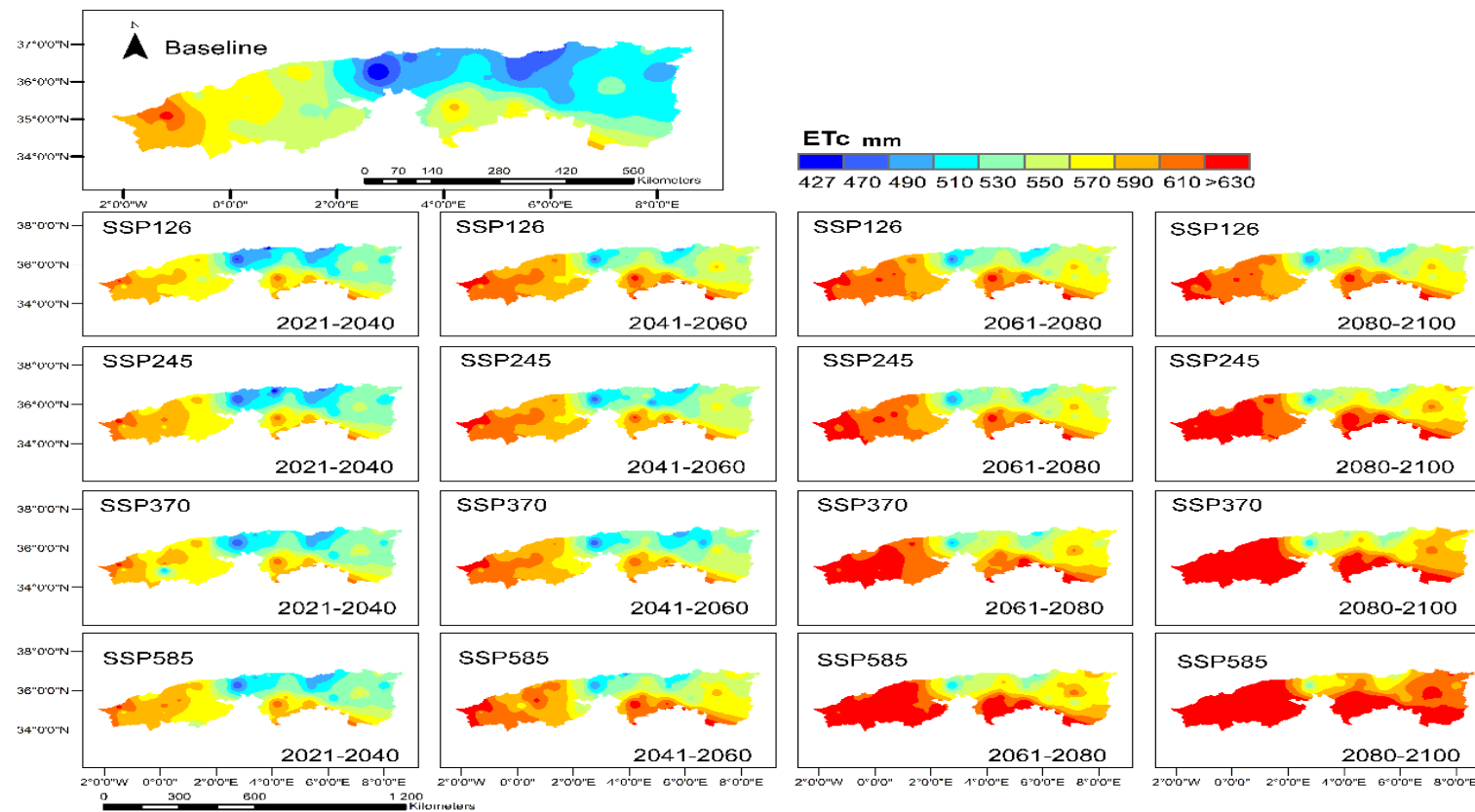


Figure 20. Projection des besoins en eau des cultures sous les différents scénarios climatiques pour les quatre période 2021-240, 2041-260, 2061-280 et 2081-2100

Sous le scénario SSP5-8.5, correspondant à une trajectoire de fortes émissions, l'analyse prospective met en évidence une intensification nettement plus marquée des besoins en eau des cultures (BEC) tout au long du XXI^e siècle. Dès la période 2021-2040, les projections indiquent une augmentation des BEC de l'ordre de +3,86 %, soit une hausse supérieure à celles observées sous les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0. Cette tendance s'accroît fortement au cours des périodes suivantes, avec des augmentations atteignant +7,50 % pour 2041-2060 et +12,09 % pour 2061-2080. À l'horizon 2081-2100, les besoins en eau devraient connaître leur progression la plus critique, dépassant +18 % par rapport à la période de référence.

Cette évolution se traduit par une augmentation très significative des besoins en eau d'irrigation, lesquels passeraient de 216 m³ ha⁻¹ à environ 1008 m³ ha⁻¹, traduisant une pression hydrique extrême sur les systèmes agricoles. Par ailleurs, les superficies caractérisées par de faibles besoins hydriques (< 550 mm) connaîtraient une régression drastique, passant de 76 % dans la situation de référence à seulement 1,7 % de la superficie totale étudiée. Ces résultats soulignent la vulnérabilité accrue des systèmes agricoles sous le scénario SSP5-8.5 et confirment l'amplification des risques liés au changement climatique en l'absence de stratégies d'atténuation efficaces.

5. Discussion générale des résultats des besoins en eau des cultures (CWR)

La tendance à la hausse des besoins en eau des cultures (CWR), illustrée dans la Figure 20, révèle une demande croissante en eau pour assurer la pérennité des cultures. Cette évolution est principalement liée à l'augmentation des températures et aux modifications des conditions climatiques, soulignant l'impérieuse nécessité d'une gestion optimisée des ressources hydriques.

Les données de référence indiquent des besoins en eau variant entre 427 mm et 693 mm, avec une moyenne de 560 mm, ce qui met en évidence l'importance des ressources hydriques déjà mobilisées pour les pratiques agricoles actuelles. Ces résultats renforcent la nécessité de maintenir et d'améliorer les stratégies de gestion de l'eau afin de répondre aux demandes futures, dans un contexte où les pressions sur les ressources hydriques ne cessent de s'accroître. Une planification rigoureuse et l'adoption de techniques d'irrigation efficaces apparaissent ainsi comme des leviers essentiels pour garantir la sécurité alimentaire tout en préservant les ressources en eau.

Les résultats mettent en évidence d'importantes disparités régionales concernant les besoins hydriques des cultures. Le nord-ouest algérien présente les exigences en eau les plus élevées, tandis que le nord-central montre des besoins plus variables.

Une approche différenciée, tenant compte des spécificités climatiques et pédologiques de chaque région, permettrait d'optimiser l'utilisation des ressources hydriques. Une telle démarche est essentielle pour répondre efficacement aux défis particuliers que rencontrent les différentes zones agricoles du pays, notamment dans un contexte de changement climatique où les pressions sur les ressources en eau ne cessent de s'accroître. L'élaboration de plans de gestion localisés, combinée à l'adoption de techniques d'irrigation précises, constituerait ainsi une piste prometteuse pour une agriculture résiliente et durable.

Les projections selon le scénario SSP126 indiquent une augmentation progressive des besoins en eau des cultures, avec une hausse de 2,23 % dans un futur proche (2021-2040), suivie d'accroissements de 6,73 % (2041-2060) et 7,67 % (2061-2080). Cette tendance se traduira par une demande accrue en eau d'irrigation, nécessitant des investissements substantiels dans les infrastructures hydrauliques et la gestion des ressources en eau pour soutenir le secteur agricole.

Parallèlement, la superficie des zones à faibles besoins hydriques devrait se réduire considérablement, passant de 76 % à seulement 34 % d'ici 2100. Cette évolution implique qu'une proportion croissante des terres agricoles nécessitera une irrigation intensive, exacerbant ainsi les pressions sur les ressources en eau déjà limitées. Ces projections soulignent l'urgence d'élaborer des politiques de gestion durable de l'eau et de promouvoir des pratiques agricoles résilientes pour faire face aux défis climatiques à venir. La modernisation des systèmes d'irrigation et l'adoption de techniques efficaces de conservation de l'eau apparaissent comme des solutions incontournables pour garantir la sécurité hydrique et alimentaire du pays.

Les projections basées sur les scénarios SSP245 et SSP370 révèlent des impacts différenciés sur les besoins en eau des cultures (CWR), avec des augmentations variant entre 2,83 % et 13,00 % d'ici la fin du siècle. Ces variations mettent en évidence l'influence déterminante des politiques climatiques et du contrôle des émissions sur la future demande en eau agricole, soulignant l'importance cruciale de l'adoption de mesures d'atténuation efficaces.

Le scénario à hautes émissions (SSP585) présente des risques particulièrement alarmants, avec une augmentation des CWR dépassant 18 % et une escalade dramatique des besoins en irrigation à l'horizon 2100. Ces projections soulignent avec force le lien critique entre réduction des émissions de gaz à effet de serre et gestion durable des ressources hydriques.

Une revue comparative des études antérieures révèle des tendances contrastées concernant l'évolution des besoins hydriques agricoles. Les travaux de Saadi et al. (2015) et Ahmad et al. (2020) corroborent nos résultats d'une augmentation des exigences en eau. Cependant, certaines recherches, notamment celles de Kourat et al. (2021, 2022) et Acharjee et al. (2017), suggèrent plutôt une diminution potentielle liée au raccourcissement des cycles culturaux sous l'effet du réchauffement. Cette divergence souligne la complexité des projections hydriques et la nécessité d'intégrer une pluralité de facteurs dans les modèles climatiques, incluant notamment les adaptations phénologiques des cultures.

Par ailleurs, nos analyses mettent en évidence une migration géographique potentielle des zones de culture vers des régions aux conditions climatiques devenues plus optimales. Ce phénomène pourrait rendre certaines zones marginales historiquement plus propices à la culture du blé, tandis que des régions traditionnellement productrices deviendraient moins favorables.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale

Cette étude prospective démontre de manière incontestable que le changement climatique impactera significativement la culture du blé d'hiver dans le nord de l'Algérie, avec des conséquences potentiellement graves sur la sécurité alimentaire du pays. Nos résultats, obtenus grâce à une méthodologie rigoureuse combinant le modèle agro-climatique CROPWAT 8.0 et les dernières projections du modèle CMIP6 (CMCC-ESM2) sous différents scénarios SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5), révèlent une augmentation alarmante des températures moyennes (de +1,5°C à +4,8°C d'ici 2100 selon les scénarios), une diminution préoccupante des précipitations printanières (de -15% à -30% pendant la période critique de croissance) et une hausse significative de l'évapotranspiration potentielle (de +7% à +18% selon les régions). Ces changements climatiques drastiques entraîneront une augmentation exponentielle des besoins en eau d'irrigation (estimée entre +20% et +35% à l'horizon 2100), un allongement des périodes de stress hydrique estival et une modification profonde des calendriers culturels optimaux, remettant en question la viabilité des pratiques agricoles conventionnelles.

L'analyse spatiale fine a par ailleurs mis en évidence d'importantes disparités régionales, avec une vulnérabilité accrue des zones semi-arides de l'intérieur (comme les hautes plaines de Sétif et Constantine) où les déficits hydriques pourraient atteindre 40%, tandis que certaines zones côtières pourraient paradoxalement bénéficier de conditions légèrement améliorées. Ces projections, corroborées par des études similaires menées dans le bassin méditerranéen (Saadi et al., 2022; IPCC AR6, 2023), soulignent l'urgence d'une transition vers des systèmes agricoles climato-intelligents. Cette transition doit s'articuler autour de quatre axes prioritaires : (1) l'optimisation des calendriers culturels, couplée à l'innovation variétale à travers le développement de cultivars thermo-tolérants à cycle court, (2) la modernisation des infrastructures d'irrigation via l'adoption généralisée de systèmes goutte-à-goutte pilotés par IA, (3) l'intégration à large échelle de pratiques agro-écologiques comme l'agriculture de conservation, et (4) la mise en place de politiques publiques intégrées combinant subventions ciblées, systèmes d'assurance climatique et plateformes de conseil agricole.

Au-delà des aspects techniques, notre étude met en lumière la nécessité d'une gouvernance anticipative et décentralisée, capable de conjuguer les échelles nationale et locale. La création d'observatoires régionaux du climat couplés à des cellules de crise interministérielles apparaît comme une mesure indispensable pour coordonner les réponses aux chocs climatiques. Les simulations économiques préliminaires indiquent que sans mesures d'adaptation rapides, les

rendements moyens pourraient chuter de 25 à 40% d'ici 2050, avec des conséquences désastreuses sur la balance commerciale agricole. Ce travail constitue donc à la fois un signal d'alarme et une feuille de route pour les décideurs politiques, les agronomes et les agriculteurs, appelant à une mobilisation collective immédiate pour transformer ces défis en opportunités de développement durable. Les prochaines recherches devront affiner ces projections par des approches multi-modèles et évaluer plus précisément le coût-bénéfice des différentes stratégies d'adaptation, tout en intégrant les dimensions sociales et institutionnelles souvent négligées dans les modèles biophysiques.

Références bibliographiques

Acevedo, E., Martínez, E., & Silva, P. (2009, February). CONSTRAINTS TO ZERO TILLAGE IN MEDITERRANEAN ENVIRONMENTS. In Lead papers, 4th world conference on conservation agriculture, New Delhi (pp. 4-7).

Adhikari, U., Nejadhashemi, A. P., & Woznicki, S. A. (2015). *Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. Food Energy Secur 4: 110–132.*

Agence nationale des ressources hydrauliques. 2009. (In MEER. 2019. National Climate Plan)

Ahmad MJ, Cho GH, Kim SH, Lee S, Adelodun B, Choi KS (2020) Influence mechanism of climate change over crop growth and water demands for wheat-rice system of Punjab. J Water Clim Change, Pakistan. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.009>

Ahmed, I., ur Rahman, M. H., Ahmed, S., Hussain, J., Ullah, A., & Judge, J. (2018). Assessing the impact of climate variability on maize using simulation modeling under semi-arid environment of Punjab, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28413-28430.

Alizadeh, O. (2022). Advances and challenges in climate modeling. *Climatic Change*, 170(1), 18.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., & Wright, J. L. (2000). Revised FAO procedures for calculating evapotranspiration: irrigation and drainage paper no. 56 with testing in Idaho. In Watershed Management and Operations Management 2000 (pp. 1-10). [https://doi.org/10.1061/40499\(2000\)125](https://doi.org/10.1061/40499(2000)125).

Ambika, S., Manonmani, V., & Somasundaram, G. (2014). Review on effect of seed size on seedling vigour and seed yield. *Research Journal of Seed Science*, 7(2), 31-38.

Andersson, A. (2005). Nitrogen redistribution in spring wheat. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, (2005: 10).

Arora, N.K. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability* 2, 95–96 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>

Ashrafuzzaman, M., Artemi, C., Santos, F. D., & Schmidt, L. (2022). Current and future salinity intrusion in the south-western coastal region of Bangladesh. *Spanish Journal of Soil Science*, 12, 10017.

Asseng, S., Foster, I., Turner, N.C., 2011. The impact of temperature variability on wheat yields. *Glob. Chang. Biol.* 17 (2), 997–1012.

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.

Basu, S. (2025). Impacts of climate change and tropical cyclones on rice farming in coastal Bangladesh. *Asian Journal of Water Environment and Pollution*, 22(4), 41.

Bélanger, J., & Pilling, D. (2019). The state of the world's biodiversity for food and agriculture;. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. 572 pp. <http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>

Benmehaia, A. M., Merniz, N., & Oulmane, A. (2020). Spatiotemporal analysis of rainfed cereal yields across the eastern high plateaus of Algeria: an exploratory investigation of the effects of weather factors. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(3), 54.

Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019). Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).

Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, 11, 151-158. DOI: 10.1007/s10113-010-0173-x.

Bouchentouf, S., & Benabdeli, K. (2021). Water resources and food security in Algeria: diagnosis and new strategy proposition. *Afr J Agric Res* 17: 414–424.

Bouregaa, T., & Chetoui, C. (2025). Assessment of climate change impact on wheat water demand and yield in Setif, Algeria. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(1), 1.

Bucchignani, E., Mercogliano, P., Panitz, H. J., & Montesarchio, M. (2018). Climate change projections for the Middle East–North Africa domain with COSMO-CLM at different spatial resolutions. *Advances in Climate Change Research*, 9(1), 66-80. DOI: 10.1016/j.accre.2018.01.004.

Buis, A. (2020). Milankovitch (orbital) cycles and their role in earth's climate. *NASA Climate*, 27(8).

Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Céleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1247-1258.

Calvin, K., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Edmonds, J., Eom, J., Hartin, C., ... & Wise, M. (2017). The SSP4: A world of deepening inequality. *Global Environmental Change*, 42, 284-296.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.

Carter, E. K., Melkonian, J., Riha, S. J., & Shaw, S. B. (2016). Separating heat stress from moisture stress: analyzing yield response to high temperature in irrigated maize. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094012.

Chadouli A et Djane-Hamed M (2015) Irrigation d'appoint du blé. Brochure, ITGC, 16 p.

- Chakraborty, S. P., Sahu, S. K., Mahapatra, S. K., Santra, S., Bal, M., Roy, S., & Pramanik, P. (2010). Nanoconjugated vancomycin: new opportunities for the development of anti-VRSA agents. *Nanotechnology*, 21(10), 105103.
- Chatzopoulos, T., Domínguez, I. P., Zampieri, M., & Toreti, A. (2020). Climate extremes and agricultural commodity markets: A global economic analysis of regionally simulated events. *Weather and Climate Extremes*, 27, 100193.
- Chavan, S. G., Duursma, R. A., Tausz, M., & Ghannoum, O. (2019). Elevated CO₂ alleviates the negative impact of heat stress on wheat physiology but not on grain yield. *Journal of Experimental Botany*, 70(21), 6447-6459.
- Chen, C., Chen, Q., Qin, B., Zhao, S., & Duan, Z. (2020). Comparison of different methods for spatial downscaling of GPM IMERG V06B satellite precipitation product over a typical arid to semi-arid area. *Frontiers in Earth Science*, 8, 536337.
- Chen, S., Chen, X., & Xu, J. (2016). Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76, 105-124.
- Chhogyel, N., Kumar, L., & Bajgai, Y. (2020). Consequences of climate change impacts and incidences of extreme weather events in relation to crop production in Bhutan. *Sustainability*, 12(10), 4319.
- Chokkavarapu, N., & Mandla, V. R. (2019). Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models: a review toward future climate change impact estimation. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1698.
- Chourghal, N., Belguerri, H., Maamri, K., Bahlouli, F., Salamani, A., & Benaini, M. (2023). Diagnosis of the rainfall-wheat yield relationship in the current and future climate change conditions in Eastern Algeria. *Biosystems Diversity*, 31(2), 158-162.
- Chourghal, N., Lhomme, J. P., Huard, F., & Aidaoui, A. (2016). Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional environmental change*, 16, 1623-1634.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, R., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W., Laprise, R., 2007. Regional climate projections. In: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. University Press, Cambridge, pp. 847–940.
- Ciscar, J. C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., ... & Soria, A. (2011). Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 2678-2683.
- Cogato, A., Meggio, F., De Antoni Migliorati, M., & Marinello, F. (2019). Extreme weather events in agriculture: A systematic review. *Sustainability*, 11(9), 2547.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichet, T., Friedlingstein, P., ... & Booth, B. B. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In *Climate change 2013-The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment*

report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 1029-1136). Cambridge University Press.

Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., Azzopardi, B., Balzan, M. V., Cherif, S., ... & Xoplaki, E. (2020). MedECC 2020 summary for policymakers. Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin–Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report, 11-40.

d'Amour, C.B., Reitsma, F., Baiocchi, G., Barthel, S., Güneralp, B., Erb, K.-H., Haberl, H., Creutzig, F., Seto, K.C., 2017. Future urban land expansion and

Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18-33.

Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18-33.

Das, J., Jha, S., & Goyal, M. K. (2020). Non-stationary and copula-based approach to assess the drought characteristics encompassing climate indices over the Himalayan states in India. *Journal of Hydrology*, 580, 124356. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124356>.

Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., & Magné, B. (2017). Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 200-214.

Dhamge, N. R., Badar, A. M., & Baiswarey, N. Z. (2008). Crop water requirement by modified Penman method using HYMOS. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 14(3), 28-42. <https://doi.org/10.1080/09715010.2008.10514920>.

Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic change*, 114, 813-822.

Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C. K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., ... & Irmak, S. (2018). Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water*, 10(4), 405. <https://doi.org/10.3390/w10040405>

Djekoun, A., Ykhlef, N., Bouzerzour, H., Hafsi, M., Hamada, Y., & Kahali, L. (2002). Production du blé dur en zones semi-arides: identification des paramètres d'amélioration du rendement. *Act des 3ème Journées Scientifiques sur le blé dur*. Constantine.

Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie: les principales caractéristiques. *Revue Nature et technologie*, 1(2), 45-53.

Döll, P., & Schmied, H. M. (2012). How is the impact of climate change on river flow regimes related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014037.

Donmez, C., Schmidt, M., Cilek, A., Grosse, M., Paul, C., Hierold, W., & Helming, K. (2023). Climate change impacts on long-term field experiments in Germany. *Agricultural Systems*, 205, 103578.

- Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A. (2019). Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1), 32-49.
- Easterling, D.R., Wehner, M.F., 2009. Is the climate warming or cooling? *Geophys. Res. Lett.* 36 (8). <https://doi.org/10.1029/2009gl037810>.
- Ebrahimi, F., Edalat, M., & Naderi, R. (2025). Optimizing planting dates and irrigation schedules to enhance wheat production in Fars Province under future climate scenarios using the CERES-Wheat model. *PeerJ*, 13, e19592.
- Eckstein, D., Hutfils, M. L., & Winges, M. (2018). Global climate risk index 2019. *Who suffers most from extreme weather events*, 36.
- El-Rawy, M., Batelaan, O., Al-Arifi, N., Alotaibi, A., Abdalla, F., & Gabr, M. E. (2023). Climate change impacts on water resources in arid and semi-arid regions: a case study in Saudi Arabia. *Water*, 15(3), 606. <https://doi.org/10.3390/w15030606>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., ... & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in plant science*, 8, 1147.
- FAO. (2009a). How to feed the world in 2050. Insights from an expert meet. In *Insights from an Expert Meeting at FAO* (Vol. 2050, pp. 1-35). Rome, Italy: FAO.
- FAO. (2009b). CROPWAT Software, Food and Agriculture Organization, Land and Water Division
- FAO. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. Rome and Earthscan, London
- FAO. (2017). The Future of Food and Agriculture–Trends and Challenges. FAO, Rome
- FAO. (2024). Agricultural Production Statistics 2010–2023. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 96.
- Fatiha Boufenar- Zaghoulane, Omar Zaghoulane. (2006). Guide des principales varietes de cereales a paille en Algerie. El Harrach, Algeria: Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC).
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Fischer, G., Tubiello, F. N., Van Velthuizen, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 1083-1107.
- Gabr, M. E. S. (2022). Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3127-3142. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01268-4>.

García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 121-139.

Garnett, T., Appleby, M. C., Balmford, A., Bateman, I. J., Benton, T. G., Bloomer, P., ... & Godfray, H. C. J. (2013). Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, 341(6141), 33-34.

Gebrechorkos, S. H., Sheffield, J., Vicente-Serrano, S. M., Funk, C., Miralles, D. G., Peng, J., ... & Dadson, S. J. (2025). Warming accelerates global drought severity. *Nature*, 1-8.

Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. *BioScience*, 52(2), 143-150.

George, B. A., Shende, S. A., & Raghuwanshi, N. S. (2000). Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agricultural water management*, 46(2), 121-136.

Gerlach, T. (2011). Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(24), 201-202.

Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. (2015). Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034017.

GREC-Sud. (2021, 15 novembre). Quelles options pour la transition ? *Cahier climat*.

Guo, J., Mao, K., Zhao, Y., Lu, Z., & Lu, X. (2019). Impact of climate on food security in mainland China: A new perspective based on characteristics of major agricultural natural disasters and grain loss. *Sustainability*, 11(3), 869.

Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104680>.

Hajdukiewicz, H., Wyzga, B., Mikuś, P., Zawiejska, J., & Radecki-Pawlik, A. (2016). Impact of a large flood on mountain river habitats, channel morphology, and valley infrastructure. *Geomorphology*, 272, 55-67.

Hansen, J., Kharecha, P., Sato, M., Masson-Delmotte, V., Ackerman, F., Beerling, D. J., ... & Zachos, J. C. (2013). Assessing “dangerous climate change”: Required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PloS one*, 8(12), e81648.

Hasegawa, T., Sakurai, G., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., & Masui, T. (2021). Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. *Nature Food*, 2(8), 587-595.

Hayes, K., Blashki, G., Wiseman, J., Burke, S., & Reifels, L. (2018). Climate change and mental health: risks, impacts and priority actions. *International journal of mental health systems*, 12(1), 28.

Hertig, E., & Trambly, Y. (2017). Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 151, 36-48. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.10.015.

Holman, I. P., Brown, C., Janes, V., & Sandars, D. (2017). Can we be certain about future land use change in Europe? A multi-scenario, integrated-assessment analysis. *Agricultural systems*, 151, 126-135.

Houria, C. (2012). Decadal evaluation of durum wheat water requirements to improve rainfed agriculture under semi-arid conditions. *Energy Procedia*, 18, 896-904.

Hristov, J., Toreti, A., Pérez Domínguez, I., Dentener, F., Fellmann, T., Elleby, C., ... & Bratu, M. (2020). Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050. *Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg*, 2020-05. implications for global croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114 (34), 8939–8944. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606036114>

Hu, J., Li, Y., & Shi, P. (2025). Impact of future climate trend and fluctuation on winter wheat yield in the North China Plain and adaptation strategies. *Scientific Reports*, 15(1), 21882.

IPCC (2001). Climate change mitigation: contribution of Working Group III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 3). Cambridge university press.

IPCC (2007) Climate change 2021: the physical science basis. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (eds) Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p 2391.

IPCC (2014a). Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change, 1132.

IPCC, (2007). Summary for policymakers. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.

IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to AR5*. Cambridge University Press.

IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Jiang, L., & O'Neill, B. C. (2017). Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 193-199.

Jose, D. M., & Dwarakish, G. S. (2020). Uncertainties in predicting impacts of climate change on hydrology in basin scale: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19), 1037.

Joseph, J., Ghosh, S., Pathak, A., & Sahai, A. K. (2018). Hydrologic impacts of climate change: Comparisons between hydrological parameter uncertainty and climate model uncertainty. *Journal of Hydrology*, 566, 1-22.

Kang, S., Payne, W. A., Evett, S. R., Robinson, C. A., & Stewart, B. A. (2009). Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity. *Agricultural Water Management*, 96(1), 167-178.

Karan, K., Singh, D., Singh, P. K., Bharati, B., Singh, T. P., & Berndtsson, R. (2022). Implications of future climate change on crop and irrigation water requirements in a semi-arid river basin using CMIP6 GCMs. *Journal of Arid Land*, 14(11), 1234-1257. <https://doi.org/10.1007/s40333-022-0081-1>.

Katzenberger, A., Schewe, J., Pongratz, J., & Levermann, A. (2021). Robust increase of Indian monsoon rainfall and its variability under future warming in CMIP6 models. *Earth System Dynamics*, 12(2), 367-386. <https://doi.org/10.5194/esd-12-367-2021>.

Kendon, E. J., Fosser, G., Murphy, J., Chan, S., Clark, R., Harris, G., ... & Tucker, S. (2019). UKCP Convection-permitting model projections: Science report.

Kendon, E. J., Prein, A. F., Senior, C. A., & Stirling, A. (2021). Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2195), 20190547.

Kheloufi Attou, A., Baba-Hamed, K., & Bouanani, A. (2025). Developing a method to model extreme rainfall events using drought indices in northern Algeria under climate change. *H2Open Journal*, 8(5), 313-335.

Kim, Y., Ohn, I., Lee, J. K., & Kim, Y. O. (2019). Generalizing uncertainty decomposition theory in climate change impact assessments. *Journal of Hydrology X*, 3, 100024.

Kirby, E. J. M. (1993). Effect of sowing depth on seedling emergence, growth and development in barley and wheat. *Field Crops Research*, 35(2), 101-111.

Kirby, E. J. M. (2002). Botany of the wheat plant. Bread Wheat. Improvement and Production. Food and Agriculture Organization of the United Nation. Rome, 19-37.

Klotzbach, P. J., Wood, K. M., Schreck III, C. J., Bowen, S. G., Patricola, C. M., & Bell, M. M. (2022). Trends in global tropical cyclone activity: 1990–2021. *Geophysical Research Letters*, 49(6), e2021GL095774.

Kogo, B. K., Kumar, L., Koech, R., & Kariyawasam, C. S. (2019). Modelling climate suitability for rainfed Maize cultivation in Kenya using a Maximum Entropy (MaxENT) approach. *Agronomy*, 9(11), 727.

- Kourat, T., Smadhi, D., & Madani, A. (2022). Modeling the impact of future climate change impacts on rainfed durum wheat production in Algeria. *Climate*, 10(4), 50.
- Kourat, T., Smadhi, D., Mouhouche, B., Gourari, N., Mostofa Amin, M. G., & Bryant, C. R. (2021). Assessment of future climate change impact on rainfed wheat yield in the semi-arid Eastern High Plain of Algeria using a crop model. *Natural Hazards*, 107(3), 2175-2203.
- 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.
- Krishna Kumar, K., Kumar, R. K., Ashrit, R. G., Deshpande, N. R., & Hansen, J. W. (2004). Climate impacts on Indian agriculture. *International Journal of climatology*, 24(11), 1375-1393.
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ø., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1-8.
- Laaboudi, A., Allaoua, C., Hafouda, L., Ballague, D., Sbargoud, S., Meterfi, J., & Herda, F. (2015). Crop coefficient and water requirement for wheat (*Triticum aestivum*) in different climate regimes of Algeria.
- Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Boom, T. V. D., Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., & Witzengerger, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of applied Biology*, 119(3), 561-601.
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., ... & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature climate change*, 10(7), 647-653.
- Lee, J. Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., ... & Christensen, H. M. (2021). Future global climate: scenario-based projections and near-term information.
- Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., & Wang, M. X. (1992). Emissions scenarios for the IPCC: an update. *Climate change*, 10(4), 75-95.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87.
- Li, J., Huo, R., Chen, H., Zhao, Y., & Zhao, T. (2021). Comparative assessment and future prediction using CMIP6 and CMIP5 for annual precipitation and extreme precipitation simulation. *Frontiers in Earth Science*, 9, 687976. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.687976>.
- Li, S., Wu, L., Yang, Y., Geng, T., Cai, W., Gan, B., ... & Ma, X. (2020). The Pacific Decadal Oscillation less predictable under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 10(1), 30-34.
- Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N., & Kaiser, H. M. (2011). The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems*, 104(4), 348-353.

- Lindsey, L., Paul, P., & Lentz, E. (2017). Wheat growth stages and associated management. Agriculture and Natural Resources Fact Sheet AGF-126, Ohio State University Extension.
- Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2008). Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 3(3), 034007.
- MADR (2019) Detailed statistical report on agricultural production (Série B). Department of Agricultural Statistics of the Ministry of Agriculture (MADR), Algiers
- Majdi, F., Hosseini, S. A., Karbalaee, A., Kaseri, M., & Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3), 1249-1262.
- Mandal, S., Breach, P. A., & Simonovic, S. P. (2016). Uncertainty in precipitation projection under changing climate conditions: a regional case study. *American Journal of Climate Change*, 5(1), 116-132.
- Markonis, Y., & Koutsoyiannis, D. (2013). Climatic variability over time scales spanning nine orders of magnitude: Connecting Milankovitch cycles with Hurst–Kolmogorov dynamics. *Surveys in Geophysics*, 34(2), 181-207.
- Masia, S., Trabucco, A., Spano, D., Snyder, R. L., Sušnik, J., & Marras, S. (2021). A modelling platform for climate change impact on local and regional crop water requirements. *Agricultural Water Management*, 255, 107005.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (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, 2(1), 2391.
- McGrath, J. M., & Lobell, D. B. (2013). Regional disparities in the CO₂ fertilization effect and implications for crop yields. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014054.
- Meehl, G. A., Hu, A., Santer, B. D., & Xie, S. P. (2016). Contribution of the Interdecadal Pacific Oscillation to twentieth-century global surface temperature trends. *Nature Climate Change*, 6(11), 1005-1008.
- Meehl, G. A., Teng, H., Capotondi, A., & Hu, A. (2021). The role of interannual ENSO events in decadal timescale transitions of the Interdecadal Pacific Oscillation. *Climate Dynamics*, 57(7), 1933-1951.
- Mehta, R., & Pandey, V. (2016). Crop water requirement (ET_c) of different crops of middle Gujarat. *Journal of agrometeorology*, 18(1), 83-87. <https://doi.org/10.54386/jam.v18i1.906>.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... & Wang, H. J. (2019). The SSP greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2019, 1-77. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>.

- Mertz, O., Halsnæs, K., Olesen, J. E., & Rasmussen, K. (2009). Adaptation to climate change in developing countries. *Environmental management*, 43, 743-752. DOI: 10.1007/s00267-008-9259-3.
- Mimi, Z. A., & Jamous, S. A. (2010). Climate change and agricultural water demand: Impacts and adaptations. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(4).
- Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 153-165.
- Mokhtari, S., Benmehaia, A. M., Nourani, A., & Hadjeb, A. (2025). Future water requirements of the wheat crop in Northern Algeria under climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 25(2), 1-14.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C., & Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic change*, 104(3), 679-701.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Nadeem, M., Li, J., Wang, M., Shah, L., Lu, S., Wang, X., & Ma, C. (2018). Unraveling field crops sensitivity to heat stress: Mechanisms, approaches, and future prospects. *Agronomy*, 8(7), 128.
- Nagy, G. J., Filho, W. L., Azeiteiro, U. M., Heimfarth, J., Verocai, J. E., & Li, C. (2018). An assessment of the relationships between extreme weather events, vulnerability, and the impacts on human wellbeing in Latin America. *International journal of environmental research and public health*, 15(9), 1802.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. D., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & Zhou, D. (2000). Special report on emissions scenarios.
- Nanda, S., Reddy, S. N., Mitra, S. K., & Kozinski, J. A. (2016). *The progressive routes for carbon capture and sequestration. Energy Sci Eng* 4 (2): 99–122.
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., ... & Lee, D. (2009). *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation* (Vol. 21). Intl Food Policy Res Inst.
- Nicholson, C. C., & Egan, P. A. (2020). Natural hazard threats to pollinators and pollination. *Global change biology*, 26(2), 380-391.
- Noto, L. V., Cipolla, G., Pumo, D., & Francipane, A. (2023). Climate change in the Mediterranean Basin (Part II): a review of challenges and uncertainties in climate change modeling and impact analyses. *Water Resources Management*, 37(6), 2307-2323.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global environmental change*, 42, 169-180.

- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. 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.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., & Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change*, 14(1), 53-67.
- Pastén-Zapata, E., Eberhart, T., Jensen, K. H., Refsgaard, J. C., & Sonnenborg, T. O. (2022). Towards a more robust evaluation of climate model and hydrological impact uncertainties. *Water Resources Management*, 36(10), 3545-3560.
- Pathak, T. B., Maskey, M. L., Dahlberg, J. A., Kearns, F., Bali, K. M., & Zaccaria, D. (2018). Climate change trends and impacts on California agriculture: a detailed review. *Agronomy*, 8(3), 25.
- Patidar, R., Mohanty, M., Sinha, N. K., Gupta, S. C., Somasundaram, J., Chaudhary, R. S., ... & Ch, S. R. (2020). Potential impact of future climate change on maize (*Zea mays* L.) under rainfed condition in central India. *Journal of Agrometeorology*, 22(1), 18-23.
- Patricola, C. M., & Cook, K. H. (2010). Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models. *Climate Dynamics*, 35, 193-212. DOI: 10.1007/s00382-009-0623-7.
- Pepper, W. J. (1992). Emissions scenarios for the IPCC. An update: Assumptions, methodology, and results: Support Document for Chapter A3. Climate change 1992: supplementary report to the IPCC scientific assessment.
- Philippine Department of Agriculture. (2022). *Odette (Rai) agricultural damage report*. <https://www.da.gov.ph/typhoon-odette-damage-report-2022>
- Pignon, C. P., & Long, S. P. (2020). Retrospective analysis of biochemical limitations to photosynthesis in 49 species: C4 crops appear still adapted to pre-industrial atmospheric [CO₂]. *Plant, Cell & Environment*, 43(11), 2606-2622.
- Poonia, V., Das, J., & Goyal, M. K. (2021). Impact of climate change on crop water and irrigation requirements over eastern Himalayan region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35, 1175-1188. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01942-6>.
- Powell, J. P., & Reinhard, S. (2016). Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather and Climate extremes*, 12, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.003>
- Priestley, M. D., Ackerley, D., Catto, J. L., Hodges, K. I., McDonald, R. E., & Lee, R. W. (2020). An overview of the extratropical storm tracks in CMIP6 historical simulations. *Journal of Climate*, 33(15), 6315-6343. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0928.1>.
- Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(2), 129-150.
- Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., & Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PloS one*, 14(5), e0217148. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>

- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Richard, C. A., Hickey, L. T., Fletcher, S., Jennings, R., Chenu, K., & Christopher, J. T. (2015). High-throughput phenotyping of seminal root traits in wheat. *Plant Methods*, 11(1), 13.
- Rimal, B., Zhang, L., Stork, N., Sloan, S., & Rijal, S. (2018). Urban expansion occurred at the expense of agricultural lands in the Tarai region of Nepal from 1989 to 2016. *Sustainability*, 10(5), 1341.
- Roushdi, M. (2024). Investigation the implications of climate change on crop water requirements in Western Nile Delta, Egypt. *Water Science*, 38(1), 77-91. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2301639>.
- Rozenberg, J., Guivarch, C., Lempert, R., & Hallegatte, S. (2014). Building SSPs for climate policy analysis: a scenario elicitation methodology to map the space of possible future challenges to mitigation and adaptation. *Climatic change*, 122(3), 509-522.
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural water management*, 147, 103-115. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.05.008.
- Samir, K. C., & Lutz, W. (2017). The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 42, 181-192.
- Santer, B. D., Painter, J. F., Bonfils, C., Mears, C. A., Solomon, S., Wigley, T. M., ... & Wentz, F. J. (2013). Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), 17235-17240.
- Schaller, N., Kay, A. L., Lamb, R., Massey, N. R., Van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E., ... & Allen, M. R. (2016). Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts. *Nature Climate Change*, 6(6), 627-634.

- Schewe, J., Gosling, S. N., Reyer, C., Zhao, F., Ciais, P., Elliott, J., ... & Warszawski, L. (2019). State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes. *Nature communications*, 10(1), 1005.
- Schilling, J., Hertig, E., Trambly, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20, 1-12. DOI: 10.1007/s10113-020-01597-7.
- Schweizer, V. J., & O'Neill, B. C. (2014). Systematic construction of global socioeconomic pathways using internally consistent element combinations. *Climatic Change*, 122(3), 431-445.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., & Klirs, C. (2019). Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. Final report.
- Shakun, J. D., Clark, P. U., He, F., Marcott, S. A., Mix, A. C., Liu, Z., ... & Bard, E. (2012). Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature*, 484(7392), 49-54.
- Sharma, D. N., & Tare, V. (2022). Assessment of irrigation requirement and scheduling under canal command area of Upper Ganga Canal using CropWat model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1863-1873. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01184-7>.
- Shiferaw, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food security*, 3(3), 307-327.
- Smid, M., & Costa, A. C. (2018). Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban systems. *International Journal of Urban Sciences*, 22(3), 277-307.
- Smith M, Kivumbi D. 2006. Calculation procedure use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy; Heng LK, Joint FAO/IAEA Division, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Smith M. 1991. CROPWAT Manual and Guidelines. FAO of UN, Rome.
- Srivastava, A., Srinivasan, V., Long, S., & Pignon, C. (2021, December). Reducing stomatal conductance in C4 plants: A trade off between water and CO2. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2021, pp. B15D-1458).
- Stancalie, G., Marica, A., & Toullos, L. (2010). Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2), 25-30.
- Stephens, G. L., L'Ecuyer, T., Forbes, R., Gettelmen, A., Golaz, J. C., Bodas-Salcedo, A., ... & Haynes, J. (2010). Dreary state of precipitation in global models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D24).
- Stoffel, M., Wyżga, B., & Marston, R. A. (2016). Floods in mountain environments: A synthesis. *Geomorphology*, 272, 1-9.

Sunil, A., Deepthi, B., Mirajkar, A. B., & Adarsh, S. (2021). Modeling future irrigation water demands in the context of climate change: A case study of Jayakwadi command area, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 1963-1977. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00955-y>.

Surendran, U., Sushanth, C. M., Mammen, G., & Joseph, E. J. (2015). Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustainable water resource management: A case study in Palakkad district of humid tropical Kerala, India. *Aquatic Procedia*, 4, 1211-1219. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.154>.

Talchabhadel, R., & Karki, R. (2019). Assessing climate boundary shifting under climate change scenarios across Nepal. *Environmental monitoring and assessment*, 191(8), 520.

Tan, X., Wu, X., Huang, Z., Fu, J., Tan, X., Deng, S., ... & Liu, B. (2023). Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 14(1), 2796.

Tapiador, F. J., Roca, R., Del Genio, A., Dewitte, B., Petersen, W., & Zhang, F. (2019). Is precipitation a good metric for model performance?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2), 223-233.

Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 365(1857), 2053-2075.

Tesfaye, K., Gbegbelegbe, S., Cairns, J.E., Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Sonder, K., Boote, K., Makumbi, D., Robertson, R., 2015. Maize systems under climate change in sub-Saharan Africa: potential impacts on production and food security. *Int. J. Clim. Change Strategies Manage.* 7 (3), 247–271.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264.

Tomczyk, A. M., White, P. C., & Ewertowski, M. W. (2016). Effects of extreme natural events on the provision of ecosystem services in a mountain environment: The importance of trail design in delivering system resilience and ecosystem service co-benefits. *Journal of Environmental Management*, 166, 156-167.

Tri, D. Q., Tran, T. D., & Truong, D. D. (2019). Application of meteorological and hydrological drought indices to establish drought classification maps of the Ba River Basin in Vietnam. *Hydrology*, 6(2), 49.

Ummenhofer, C. C., & Meehl, G. A. (2017). Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160135.

UNCTAD. (2021). *Hurricanes Eta and Iota: The economic toll on Central American agriculture*. <https://unctad.org/news/hurricanes-eta-and-iota-economic-toll-central-american-agriculture>

- United Nations, 2019, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). World population prospects 2019: Highlights.
- Van Loon, A. F., Stahl, K., Di Baldassarre, G., Clark, J., Rangescroft, S., Wanders, N., ... & Van Lanen, H. A. (2016). Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3631-3650.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5.
- Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., ... & Arnell, N. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22(1), 21-35.
- Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., ... & Krysanova, V. (2017). Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419-433.
- Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., ... & Frieler, K. (2019). The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054010.
- Wang, H. M., Chen, J., Xu, C. Y., Zhang, J., & Chen, H. (2020). A framework to quantify the uncertainty contribution of GCMs over multiple sources in hydrological impacts of climate change. *Earth's Future*, 8(8), e2020EF001602. <https://doi.org/10.1029/2020EF001602>.
- Wang, W., Sun, F., Luo, Y., & Xu, J. (2012). Changes of rice water demand and irrigation water requirement in Southeast China under future climate change. *Procedia Engineering*, 28, 341-345.
- Wind, T. R., Kawachi, I., & Komproe, I. H. (2021). Multilevel social mechanisms of post-disaster depression. *International journal of environmental research and public health*, 18(2), 391.
- Woldemeskel, F. M., Sharma, A., Sivakumar, B., & Mehrotra, R. (2014). A framework to quantify GCM uncertainties for use in impact assessment studies. *Journal of Hydrology*, 519, 1453-1465.
- Worku, T. A., Aman, T. F., Wubneh, M. A., & Manderso, T. M. (2023). Impact of climate change on shumbrite small scale irrigation project, South Gojjam subbasin, Ethiopia. *Heliyon*, 9(5).
- World Health Organization. (2020). *The state of food security and nutrition in the world 2020: transforming food systems for affordable healthy diets* (Vol. 2020). Food & Agriculture Org..
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., ... & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360.
- Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., ... & Waterfield, T. (2018). Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. *Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, 32.
- Zhang, Y., Kang, C., Lin, S., Yang, Z., Wu, Y., & Wei, S. (2025). Effects of Elevated CO₂ on Grain Yield and Quality in Different Wheat Cultivars. *Agronomy*, 15(6), 1359.

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., ... & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 114(35), 9326-9331.

Zhao, J., Guo, J., Xu, Y., & Mu, J. (2015). Effects of climate change on cultivation patterns of spring maize and its climatic suitability in Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 178-187.

Zhou, T., Wu, P., Sun, S., Li, X., Wang, Y., & Luan, X. (2017). Impact of future climate change on regional crop water requirement-A case study of Hetao Irrigation District, China. *Water*, 9(6), 429. <https://doi.org/10.3390/w9060429>.