

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش الجزائر

THESE

Présentée par : **Nacira CHOURGHAL**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT en Sciences Agronomiques**

Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie

Soutenue le

2016 devant le jury composé de :

Président	L. MEKLICHE	Professeure	ENSA, Alger
Directeur de thèse	A. AIDAOUI	Professeur	ENSA, Alger
Co-directeur de thèse	J. P. LHOMME	Directeur de recherche	IRD, France
Examineur	T. HARTANI	Professeur	U. Tipaza
Examineur	M.N. CHABACA	Professeur	ENSA, Alger

« Nous ignorons comment sont réellement les choses et [...] nous n'en connaissons que la représentation que nous en faisons. »

A. Einstein

« Il n'y a qu'un passé et il n'existe qu'un seul présent, par contre il y a une multitude de futurs, mais seul l'un d'eux se réalise. »

P. Geluck

« Le futur appartient à ceux qui voient les possibilités avant qu'elles ne deviennent évidentes. »

T. Levitt

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements. »

Charles Darwin

Dédicace

*A ma source de courage et de volonté tout au
Long de ces années de thèse; mon cher mari Nourredine
et mes adorables enfants Amani, Malak
et Abd Erraouf.*

Nacira

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse fut une occasion unique de rencontre et d'échange avec de nombreuses personnes. Chacun a apporté, à des degrés divers, mais avec une égale bienveillance, une contribution à sa finalisation. Mes dettes de reconnaissance sont, à ce point de vue, énormes à leur égard.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, monsieur AIDAOUI Abdellah, professeur à l'ENSA pour le soin et l'attention avec lesquels il a suivi mes travaux. Il m'a toujours aidé et montré les meilleures voies pour avancer sûrement dans la réalisation de ce travail. Je le remercie infiniment pour son apport scientifique que pour ses qualités humaines.

Je ne saurais jamais remercier comme il le mérite mon co-directeur de thèse, monsieur Jean Paul LHOMME, directeur de recherche à l'IRD pour l'opportunité qu'il m'a offerte de pouvoir réaliser ma thèse dans un axe de recherche d'actualité. Sa pertinence, sa compétence mais aussi son ouverture d'esprit ont été décisives pour orienter et faire progresser ce travail. Qu'il trouve ici, mes chaleureux remerciements pour son suivi régulier, son aide, son écoute, ses relectures pertinentes et patientes tout au long de ces années de thèse.

Madame MEKLIICHE Leïla, professeure à l'ENSA, a bien voulu accepter de présider le jury de ma thèse, je la remercie infiniment.

Monsieur HARTANI Tarik, professeur à l'Université de Tipaza et monsieur CHABACA Mohamed-Nacer, Professeur à l'ENSA, ont bien voulu accepter d'examiner ce travail, je les en remercie infiniment.

Monsieur HUARD Frédéric, ingénieur de recherche à l'US AGROCLIM d'Avignon, a contribué précieusement dans ce travail lors de la génération des données climatiques, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie le directeur général de l'ITGC, monsieur Zaghouane Omar ainsi que monsieur Mekliche Arezki, Maître de conférence à l'ENSA, pour avoir facilité l'acquisition des données de rendement pour les deux zones d'étude.

Mes remerciements s'adressent aussi à monsieur SELLAM Fouad, Enseignant à l'ENSA, et à monsieur ALIOUI chef de la station météorologique de Bordj Bou Arreridj, d'avoir bien voulu me fournir les séries climatiques historiques des deux zones d'étude.

Je remercie monsieur MOLENAT Jérôme, directeur de l'UMR LISAH à Montpellier SupAgro, de m'avoir accueilli régulièrement au sein de son laboratoire, depuis le début de ce travail et jusqu'à sa finalisation.

Je remercie monsieur PREVOT Laurent chargé de recherche à l'INRA pour sa contribution lors de ma collecte bibliographique.

Mes remerciements vont aussi à tout le personnel du LISAH, pour avoir aidé et facilité mon travail lors de mes séjours au sein du laboratoire, je remercie particulièrement: BLANCA Yves, NAJIM Aziza, FANTANA Cécile, DUBREUIL Arnaud et LAGOUTE Sandra.

Je ne pourrai oublier de remercier ma famille dont le soutien était précieux, particulièrement lors de mes séjours à Montpellier ainsi que mes chers amis : IRATNI Nadjat, GUEDOURA Ilham, BOUKHALFA Hassina, BOUNOUARA Zohra, MONTE Carlo, BOUTEFEHA Maroua et BAHLOULI Faicel.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xiii
INTRODUCTION	1
PARTIE I. BIBLIOGRAPHIE	
Chapitre 1. Le changement climatique : observations et projections	6
1. Introduction	6
2. Variabilité climatique et changement climatique	6
3. Causes de la variabilité climatique et du changement climatique	7
3.1. Causes d'origine naturelle	7
3.1.1. Périodicité astronomique	7
3.1.2. Le cycle des taches solaires	7
3.1.3. Volcans	7
3.1.4. Les courants océaniques	8
3.1.5. La cryosphère	8
3.2. Causes d'origine anthropique	8
3.2.1. Modification de la composition naturelle de l'atmosphère	8
3.2.1.1. Gaz à effet de serre (GES) ou green house gases « GHG »	8
3.2.1.2. Les composés chlorés et combustion des énergies fossiles	10
3.2.2. Utilisation des terres et changement dans de la couverture terrestre	11
4. Les changements observés dans le climat récent	11
4.1. A travers le globe	11

4.2. A travers le bassin méditerranéen et le nord de l’Afrique	13
5. Modélisation du climat et scénarios futurs du changement climatique	14
5.1 Les modèles climatiques	14
5.2 Les scénarios futurs du changement climatique	15
5.3 Incertitudes liées à la prédiction du climat	18
5.4. Méthodes de correction des données climatiques simulées	19
6. Les prédictions du climat futur	20
6.1. A l’échelle du globe	20
6.1.1. Températures	20
6.1.1. Précipitations	22
6.1.3. Evénements extrêmes	22
	23
6.2. A l’échelle de la région méditerranéenne et du nord de l’Afrique	
6.2.1. Températures	23
6.2.2. Précipitations	25
6.2.3 Evénements extrêmes	26
7. Conclusion	27
Chapitre 2. Modélisation des cultures et impact du changement climatique sur la culture du blé dur	28
1. Introduction	28
2. Simulation et modélisation	29
2.1. Importance de l’outil de simulation	29
2.2. Classification générale des modèles	30
2.3. La démarche dans la modélisation	30
3. Les modèles de culture	32

3.1. Description, classification et utilisation	32
3.2. Chronologie et évolution	34
3.3. Organisation et conception	35
3.3.1. Développement	36
3.3.2. Croissance	36
3.3.3. Répartition des assimilés et rendement	37
3.3.4. Environnement	37
3.3.4.1. Bilan hydrique	37
3.3.4.2. Bilan de nutriments	38
3.3.4.3. Paramètres climatiques	38
3.3.5. Itinéraire technique, gestion de la culture et caractéristiques des cultivars	39
3.4. Méthodologie d'application dans les études d'impact du changement climatique	40
4. Les impacts attendus du changement climatique sur la culture de blé dur	41
4.1 Impacts du réchauffement futur	41
4.2. Effets d'une atmosphère enrichie en CO ₂	43
4.3. Incidence des événements extrêmes	44
5. Interactions entre les principales composantes du changement climatique et importance du choix de l'itinéraire technique	47
6. Conclusion	49

PARTIE II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Chapitre 3. Matériels et méthodes	50
1. Introduction	50
2. Zones d'études	50
2.1. Situation géographique	50

2.2. Description du climat et du sol	51
2.3. Données Climatiques historiques	52
2.4. Rendements observés	54
3. Simulation du climat présent et scenarios climatiques futurs	54
3.1. Modèle climatique	54
3.2. Correction des données simulées	57
3.3. Comparaison entre climats	58
4. Simulation de la culture du blé dur	59
4.1. Détermination de la date de semis	59
4.2. Détermination de la durée théorique des phases phénologiques	60
4.3. Calcul du rendement potentiel (maximum) et de l'évolution du LAI	60
4.4. Calcul du bilan hydrique sur le cycle cultural	62
4.5. Interruption du cycle par un stress hydrique pendant la période de floraison	64
4.6. Calcul du rendement réel Y_a	65
5. Programmation, organisation et sorties du modèle	65
6. Validation du modèle	68
6.1. Le coefficient de détermination et les paramètres de la droite de régression	68
6.2. Le biais moyen	68
6.3. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne	69
7. Estimation de l'impact du changement climatique sur le développement et le Rendement de la culture de blé dur	69
8. Conclusion	70

PARTIE III. RESULTATS

Chapitre 4. Evaluation des performances du modèle de culture et validation	101
---	------------

1. Introduction	101
2. Rendements observés	101
3. Rendements simulés	102
4. Performances du modèle et validation	102
4.1 Paramètres de la droite de régression et coefficient de détermination	102
4.2 RMSE et biais moyen	105
5. Conclusion	106

Chapitre 5. Le climat récent observé et les changements climatiques futurs a Alger et Bordj Bou Arreridj

I. Introduction	
2. Le climat récent observé	
2.1. Caractéristiques du climat récent observé	
2.1.1. Valeurs interannuelles	
2.1.2. Moyennes mensuelles interannuelles	
2.2. Evolution du climat durant le passé récent	
2.2.1. Précipitations	
2.2.2. Températures	
2.2.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent	
3. Le climat actuel simulé	
3.1. Températures	
3.2. Précipitations	
3.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent	
4. Le changement climatique futur	
4.1. Caractéristiques du climat futur	
4.1.1. Température	

4.1.2. Précipitations	
4.1.3. Evapotranspiration de référence	
4.1.4. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent	
4.2. Les tendances saisonnières du climat futur	
4.2.1. Températures	
4.2.2. Précipitations	
4.2.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent	
4.2.4. Evapotranspiration de référence	
5. Conclusion	
Chapitre 6. Les impacts du changement du climat sur la culture du blé dur a Alger et à Bordj Bou Arreridj	107
1. Introduction	107
2. Impact du changement climatique sur le semis	107
3. Impact du changement climatique sur le développement de la culture	108
3.1. Cas de l'accomplissement normal du cycle de culture	108
3.1.1. Dates de semis	108
3.1.2. Réalisation dans le temps des phases végétatives et reproductives	109
3.1.2.1. Cas d'un semis dynamique	109
3.1.2.2. Cas de semis prescrit	114
3.1.3. Dates de récolte	117
3.1.3.1. Cas du semis dynamique	117
3.1.3.2. Cas de semis prescrit	119
3.1.4. Longueur du cycle de culture	119
3.2. Cas de l'interruption du cycle de culture par un stress hydrique	120
3.2.1. Echech total du cycle de culture	120

3.2.2. Echec partiel du cycle de culture	121
4. Impact du changement du climat sur les caractéristiques hydriques	122
4.1. L'évapotranspiration réelle cumulée moyenne sur le cycle de culture (ETCM)	122
3.2. La pluie cumulée (pc) sur le cycle de culture	128
4.3. Le déficit hydrique cumulé moyen sur le cycle de culture (DHCM)	129
3.4. L'indice de stress hydrique moyen (ISH)	130
4. Impact du changement climatique sur le rendement	130
4.1. Matière sèche totale accumulée sur le cycle de culture (TDM)	131
4. 2. Le rendement potentiel ou maximum (Ym)	134
4. 3. Le rendement réel ou actuel (Ya)	137
5. Conclusion	139
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	
Conclusion générale	140
Perspectives	145
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	147
ANNEXE A	175
RESUMES	181

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

LISTE DES SYMBOLES AVEC LETTRES ROMAINES

Symbole	Définition
DDM	Daily Dray Mater
DHC	Déficit hydrique de la culture
D_k	Date du stade de croissance k
e_a	Pression de vapeur réelle
e_s	Pression de vapeur saturante à la température de l'air
ET	Evapotranspiration Réelle de la culture
ET_0	Evapotranspiration de référence
ETc	Evapotranspiration de la Culture dans les conditions optimales de culture
FAR	Fourth Assesment Report
G	Densité de flux de chaleur dans le sol
GCM	Global Climate Model
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
HI	Harvest Index
Hr	Humidité Relative moyenne de l'air
IPCC	International Panel on Climate Change
ISH	Indice de stress hydrique
K_c	Coefficient de culture
K_{ws}	Coefficient décrivant le stress hydrique
K_v	Facteur de réponse du rendement
L	Longueur d'un stade de croissance
LAI	Life Area Index
LAI_x	Maximum Life Area Index
LULCC	Land Use and Land Cover Change
n	Durée réelle d'ensoleillement
N	Durée maximum possible d'ensoleillement
N_{ds}	Nombre de jours consécutifs sans réserve disponible
N_f	Date limite exprimée en nombre de jours après floraison
N_s	Nombre de jours consécutifs défini par le modèle pour l'accumulation de P_s
P	Précipitation moyenne
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PAR_a	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
P_f	Précipitations futures
P_s	Précipitations simulées
P_s	Quantité de précipitation exigée pour la réalisation du semis
Q-Q	La méthode de correction de variables Quantile- Quantile

RD	Réserve Disponible en eau du sol
RFU	Réserve Facilement Utilisable
RCM	Regional Climate Model
R_n	Rayonnement net de la culture
R_s	Rayonnement solaire
R_{s0}	Rayonnement Solaire Extraterrestre,
RU	Réserve Utile en eau du sol
RUE	Rayonnement Use Efficiency
SAU	Surface Agricole Utile
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
ST_k	Somme de température nécessaire à la réalisation du stade k
T	Température moyenne de l'air
TAR	Third Assesment Report
TDM	Total Dry Mater
T_f	Température future
T_s	Température simulée
U_2	Vitesse du vent à 2 m de hauteur
Y_m	Maximum Yield
Y_m	Actual Yield

LISTE DES SYMBOLES AVEC LETTRES GRECQUES

Symbole	Définition
ε_a	Efficienc e d'absorption
ε_b	Efficienc e Biologique de conversion
ε_c	Efficienc e Climatique
ε_{b0}	Valeur initiale de l'efficienc e biologique de conversion
γ	Constante psychrométrique
Δ	Dérivée de la courbe de pression de vapeur saturante
δ	Anomalies calculées sur la température
ρ	Anomalies calculées sur la précipitation, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l'évapotranspiration de référence.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750.	10
Tableau 2. Projection des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du 21 ^{ème} siècle, à un niveau global.	21
Tableau 3 Résumé des résultats des 21 modèles globaux du GIEC sur le changement des précipitations pour la zone méditerranéenne calculés entre les périodes 1980-1999 et 2080-2099 pour le scénario A1B (IPCC, 2007).	25
Tableau 4. Effets d'une sélection de facteurs environnementaux sur les différents processus de la plante et leur utilisation dans la modélisation.	39
Tableau 5. Zones d'action des stations expérimentales de l'ITGC.	55
Tableau 6. Table de distribution des quantiles des deux périodes de référence (observée et simulée).	58
Tableau 7. Paramètres du modèle de simulation de la culture de blé dur	68
Tableau 8. Résultats du test de comparaison de Student- Fisher, entre rendements observés et simulés pour la région d'Alger.	73
Tableau 9. Moyennes et écarts types interannuels des variables climatiques pour les deux zones d'étude.	79
Tableau 10. Moyennes mensuelles interannuelles de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire à Alger	82
Tableau 11. Moyennes mensuelles interannuelles de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire à Bordj Bou Arreridj	82
Tableau 12. Anomalies moyennes mensuelles de la température du climat futur dans les deux régions d'étude.	91
Tableau 13. Anomalies moyennes mensuelles des précipitations du climat futur dans les deux régions d'étude.	93
Tableau 14. Anomalies moyennes mensuelles de l'évapotranspiration de référence du climat futur dans les deux régions d'étude.	94
Tableau 15. Anomalies moyennes mensuelles du rayonnement solaire moyen, humidité relative moyenne de l'air et vitesse moyenne du vent, du climat futur	97

dans les deux régions d'étude.

Tableau 16. Taux d'échec du semis dynamique correspondant aux situations actuelle et future, à Alger et Bordj Bou Arreridj	107
Tableau 17. Dates de semis dans les situations actuelle et future, dans les deux régions d'étude.	108
Tableau 18. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Alger (cas de semis non prescrit).	110
Tableau 19. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Bordj Bou Arreridj (cas de semis non prescrit).	112
Tableau 20. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Alger (cas de date de semis prescrite).	114
Tableau 21. Dates de réalisations et durées des phases végétative et reproductive à Bordj Bou Arreridj (cas de date de semis prescrite).	116
Tableau 22 Dates de récolte dans les situations actuelle et future, dans les deux régions d'étude.	119
Tableau 23. Raccourcissement du cycle de la culture de blé dur dans les situations futures à Alger et Bordj Bou Arreridj	120
Tableau 24. Taux d'échec total du cycle de culture (%) dans les deux cas de semis et les deux types de climat, à Alger et Bordj Bou Arreridj.	121
Tableau 25. Taux d'échec partiel du cycle de culture (%) dans les deux cas de semis et les deux types de climat, à Alger et Bordj Bou Arreridj.	122
Tableau 26. Evapotranspiration cumulée sur le cycle de culture (mm) dans les deux cas de semis, à Alger et Bordj Bou Arreridj.	125
Tableau 27. Pluie cumulée sur le cycle (mm) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.	128
Tableau 28. Déficit hydrique moyen cumulé sur le cycle de culture dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.	129
Tableau 29. Valeurs de l'indice de stress hydrique sur le cycle de culture dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.	130
Tableau 30. Matière sèche totale accumulée sur le cycle de culture (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.	131
Tableau 31. Rendement potentiel (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.	134

Tableau 32. Rendement réel (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj. 137

Annexe A

Tableau 1. Résultats de la comparaison des températures mensuelles interannuelles observées et simulées à Alger et Bordj Bou Arreridj.	180
Tableau 2. Résultats de la comparaison des précipitations mensuelles interannuelles observées et simulées à Alger et Bordj Bou Arreridj.	181
Tableau 3. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées du rayonnement solaire à Alger et Bordj Bou Arreridj.	182
Tableau 4. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées de l'humidité relative de l'air à Alger et Bordj Bou Arreridj.	183
Tableau 5. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées de la vitesse du vent à Alger et Bordj Bou Arreridj.	184
Tableau 6. Résultats de la comparaison entre valeurs moyennes interannuelles observées et simulées de températures T, précipitations, rayonnement solaire Rs, Humidité relative de l'air Hr et vitesse moyenne du vent U.	185

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Evolutions des concentrations de gaz carbonique (CO ₂), de méthane (CH ₄), de protoxyde d'azote (N ₂ O) et des principaux halocarbures.	9
Fig. 2. Changements dans la température, le niveau de la mer et la couverture neigeuse de l'hémisphère nord.	12
Fig. 3. Schéma de la méthode des modèles climatiques régionaux à grilles emboîtées	16
Figure 4. (a) Emission globale (en PgCO ₂ par an) et (b) concentration atmosphérique en CO ₂ (en ppm) dans les six scénarios SRES de l'IPCC, 2000 (A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2).	18
Fig. 5. Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI ^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues avec plusieurs modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan pour le scénario A1B du SRES.	21
Fig. 6. Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de la variation et les zones en pointillé à celles où plus de 90 % des modèles concordent sur celui-ci.	23
Fig. 7. Température (en haut, en °C) et Précipitations (en bas, en %) attendues entre la fin du 20 ^e siècle et la fin du 21 ^e siècle, en Europe et dans le bassin Méditerranéen (à gauche, en hiver, à droite, en été) pour un réchauffement global de 3°C.	24
Fig. 8. Descriptif de l'impact du changement climatique par l'IPCC	28
Fig. 9. Etapes de la démarche de modélisation.	31
Fig. 10. Organigramme schématique d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier.	35
Fig. 11. Situation géographiques des deux zones d'étude.	51

Fig. 12. Aires de production des céréales en Algérie	52
Fig. 13. Répartition des stations expérimentales de l'ITGC	55
Fig. 14. Organigramme du modèle de simulation de la culture de blé dur.	66
Fig. 15. Comparaison des rendements observés et simulés à Alger et Bordj Bou Arreridj.	74
Fig. 16. Rendements simulés contre rendements observés pour les deux régions d'étude.	75
Fig. 17. Moyennes mensuelles interannuelles de précipitations, évapotranspiration de référence et température moyenne de l'air à Alger (données historiques).	80
Fig. 18. Moyennes mensuelles interannuelles de précipitations, évapotranspiration de référence et température moyenne de l'air de Bordj Bou Arreridj (données historiques)	81
Fig. 19. Evolution des précipitations annuelles durant le passé récent à Alger (1978-2007) et Bordj Bou Arreridj (1980-2009).	83
Fig. 20. Evolution des températures moyennes annuelles durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.	84
Fig. 21. Evolution du rayonnement solaire moyen annuel durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.	85
Fig. 22. Evolution de l'humidité relative moyenne annuelle durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.	86
Fig. 23. Evolution de la vitesse de vent moyenne annuelle durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.	86
Fig. 24. Comparaison entre climat observé et climat simulé : températures mensuelles interannuelles à Alger et Bordj Bou Arreridj.	87
Fig. 25. Comparaison entre climat observé et climat simulé : précipitations mensuelles interannuelles à Alger et Bordj Bou Arreridj.	89
Fig. 26. Comparaison entre climat observé et climat simulé dans les deux zones d'étude : valeurs mensuelles interannuelles du rayonnement solaire, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse moyenne du vent.	90
Fig. 27. Températures moyennes mensuelles interannuelles du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	92
Fig. 28. Précipitations moyennes mensuelles interannuelles du climat actuel et	94

futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	
Fig. 29. Evapotranspirations de référence mensuelles interannuelles du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj	95
Fig. 30. Rayonnement solaire moyen mensuel interannuel du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	96
Fig. 31. Humidité relative moyenne mensuelle interannuelle du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	98
Fig. 32. Vitesse moyenne mensuelle interannuelle du vent du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	99
Fig. 33. Tendances saisonnières des températures moyennes futures à Alger et Bordj Bou Arreridj.	101
Fig. 34. Tendances saisonnières des précipitations moyennes futures à Alger et Bordj Bou Arreridj.	101
Fig. 35. Tendances saisonnières du rayonnement solaire moyen futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.	102
Fig. 36. Tendances saisonnières de l'humidité relative moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.	103
Fig. 37. Tendances saisonnières de la vitesse du vent moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.	104
Fig. 38. Tendances saisonnières de l'évapotranspiration de référence moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.	105
Fig. 39. Décalage futur du cycle de culture, et raccourcissement des phases phénologiques du blé dur à Alger : cas de Date de Semis Non Prescrite.	111
Fig. 40. Décalage futur du cycle de culture, raccourcissement des phases phénologiques du blé dur à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Non Prescrite.	113
Fig. 41. Décalage futur du cycle de culture, et raccourcissement des phases phénologiques du blé dur à Alger : cas de Date de Semis Prescrite au 1 ^{er} Novembre).	115
Fig. 42. Décalage futur du cycle de culture, et raccourcissement des phases phénologiques du blé dur à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Prescrite au 1 ^{er} Novembre.	118
Fig. 43. Impact du changement du climat sur les paramètres hydriques de la	123

plante et du sol à Alger : cas de Date de Semis Non Prescrite.	
Fig. 44. Impact du changement du climat sur les paramètres hydriques de la plante et du sol à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Non Prescrite.	124
Fig. 45. Impact du changement du climat sur les paramètres hydriques de la plante et du sol à Alger : cas de Date de Semis Prescrite.	126
Fig. 46. Impact du changement du climat sur les paramètres hydriques de la plante et du sol à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Prescrite.	127
Fig. 47. Impact du changement du climat sur la matière sèche totale et le rendement potentiel à Alger : cas de Date de Semis Non Prescrite.	132
Fig. 48. Impact du changement du climat sur la matière sèche totale et le rendement potentiel à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Non Prescrite.	133
Fig. 49. Impact du changement du climat sur la matière sèche totale et le rendement potentiel à Alger : cas de Date de Semis Prescrite.	135
Fig. 50. Impact du changement du climat sur la matière sèche totale et le rendement potentiel à Bordj Bou Arreridj : cas de Date de Semis Prescrite.	135

INTRODUCTION GENERALE

Si le climat a constamment évolué à l'échelle des temps géologiques, du fait de la variation de la position de la terre par rapport au soleil (Berger et al., 1990a; 1990b ; Berger et Loutre, 1991; Berger, 1995), on observe actuellement des changements climatiques particulièrement rapides qui ne sont pas d'ordre astronomique. Ces modifications sont observées depuis la fin du 19ème siècle et sont dues à la pression historique de l'homme sur les ressources de l'enveloppe terrestre superficielle qui a abouti, avec un très grand degré de certitude, à la perturbation de l'équilibre énergétique qui régit le climat sur terre. Actuellement, la communauté scientifique admet que le changement climatique observé ces dernières décennies est le fait d'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) et autres gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, à laquelle les activités humaines ont très fortement contribué (IPCC, 2013). Depuis l'âge préindustriel à 2005, le taux de CO₂ dans l'air est passé de 278 ppm à 379 ppm, induisant le réchauffement le plus rapide dans l'histoire de la terre avec une augmentation de la température de l'ordre de 0.74°C (UNFCCC, 2007).

Dès les années 1960, de nombreux scientifiques ont travaillé sur l'estimation de l'impact de l'accroissement du taux de CO₂ sur l'augmentation des températures et sur le climat futur de manière générale (Smagorinsky et al., 1965 ; Gebhart, 1967 ; Manabe, 1969 ; Manabe et Brian, 1969 ; Bryson, 1970 ; Robinson et Robbins, 1970 ; Broecker, 1975 ; Ramanathan et al., 1985 ; Watts, 1980). Les résultats de ces diverses études ont conduit à la création du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) en 1988 dont les travaux ont permis l'établissement d'une famille de scénarios (SRES) d'évolution socio-économique future, pour lesquels on peut prévoir des concentrations différentes en GES. Ces scénarios couvrent différentes orientations politico-socio- économiques allant d'une consommation massive de l'énergie fossile, à une utilisation importante de technologies propres, en passant par un système énergétique équilibré entre les ressources fossiles et renouvelables (Gallopin et al., 1997 ; IPCC, 2007).

En parallèle, d'autres travaux scientifiques ont porté sur le développement de modèles climatiques de circulation globale MCG et de circulation régionale MCR, qui, utilisant les

scénarios SRES développés par l'IPCC (GIEC) arrivent à projeter le climat futur tant à l'échelle globale que régionale.

Ces modèles s'accordent sur le fait que l'accroissement des gaz à effet de serre provoquera un changement du climat qui va se traduire principalement par un réchauffement moyen de 1,5 à 6 °C en 2100 (IPCC, 2007 ; 2013). Le réchauffement augmentera l'évaporation et les précipitations, surtout dans les régions tropicales et équatoriales. Les pluies seront plus fortes dans les régions où elles sont abondantes, tandis que les zones peu arrosées connaîtront des sécheresses plus sévères. Les modèles prévoient aussi une forte augmentation des événements extrêmes : inondations, sécheresses, fortes chaleurs et vents élevés.

Les analyses du climat passé (Kostopoulou et Jones, 2005) et les simulations des GCM pour les prochaines décennies (Giannakopoulos et al., 2009 ; Niang et al. 2014) montrent que la partie sud du bassin méditerranéen est l'une des zones les plus vulnérables aux changements climatiques futurs. Elle connaîtra une considérable augmentation de température et un grand changement dans la fréquence des événements climatiques extrêmes (Ventrella et al., 2012). En Afrique du Nord, les précipitations annuelles sont susceptibles de diminuer de 10 % à 20 % au cours du 21^{ème} siècle (Gibelin et Déqué, 2003; Rowell, 2005) et la température pourrait augmenter de 2 à 3 °C d'ici 2050 (Paeth et al, 2009). Dans ces régions, les changements climatiques projetés posent un défi significatif (Mougou et al., 2011). Les études montrent que l'agriculture africaine est susceptible d'être la plus touchée du fait de sa forte dépendance des faibles revenus de l'agriculture pluviale, mais surtout en raison de sa faible capacité d'adaptation (Mertz et al., 2009).

En Algérie, le secteur agricole dépend essentiellement des précipitations (Schilling et al., 2012) et l'agriculture pluviale couvre 98,6 % de la superficie agricole totale (Cline, 2007). La céréaliculture est une activité ancienne du milieu agricole algérien. Elle est présente dans tous les étages bioclimatiques y compris les zones sahariennes, avec une prédominance de la culture du blé dur (BSA, 2007). Elle domine le Nord de l'Algérie, et est pratiquée en pluviale sur 2.7 millions d'hectares, jachère comprise, soit sur 97 % de la Surface Agricole Utile (SAU) : 80 % de cette surface est localisée dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides, se caractérisant par des pluies variables, aléatoires et déficitaires (Smadhi et al., 2013). Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et fournissent plus de 60 % de l'apport calorifique et 75 à 80 % de l'apport protéique de la ration alimentaire (Djermoune, 2009). Cependant, la production dans ce secteur reste faible et avoisine les 25 millions de quintaux pour un rendement moyen de 9 q/ha (BSA, 2007). Elle ne répond en effet qu'au quart du besoin annuel de consommation estimé à 80 millions de

quintaux (CNIS, 2005). Une situation qui oblige l'Algérie à importer 60 millions de quintaux par an, dont 44 % de blé dur, et à payer des factures lourdes, ayant atteint en 2011 les 2.4 milliards de dollars (CNIS, 2011).

Cette situation de déficit d'autosuffisance va s'accroître encore plus dans le climat futur, particulièrement dans la zone sud du bassin méditerranéen, qui, avec ses pays en voie de développement, est classée parmi les points du globe les plus vulnérables aux changements climatiques (IPCC, 2007 ; 2013). Les sociétés dans ces zones vont vivre des situations d'insécurité alimentaire encore plus graves (Parry et al., 1999; Fischer et al., 2002; Hitz et Smith, 2004; Lobell et al., 2008).

L'agriculture est intimement liée au climat. Les plantes aussi bien naturelles que cultivées seront affectées par les changements de ses différentes composantes, principalement l'accroissement de la concentration de CO₂ (Kimball 1983; Bazzaz 1990; Norby et Luo 2004) et l'élévation de la température (Ferris et al. 1998; Challinor et al. 2005). De nombreuses études ont porté sur les effets de la variabilité et des changements climatiques sur la croissance des cultures et le rendement (Kaiser et al, 1993; Parry et al., 2004; Xiao et al., 2008; Tao et Zhang, 2011). L'approche la plus commune consiste à utiliser des modèles de simulation des cultures, en combinaison avec les caractéristiques pédologiques et culturelles, pour évaluer les impacts potentiels des conditions climatiques prévues sur les systèmes agricoles, la croissance des cultures et les rendements, aussi bien à l'échelle continentale que régionale (Hansen et al., 2004; Cline, 2007; Francisco et Meza-Daniel, 2009; Moriondo et al, 2011). Les études montrent que l'effet du réchauffement climatique sur le développement, la productivité et le rendement des cultures devient négatif à partir d'une augmentation de la température de +1 °C, et que à l'inverse, l'effet fertilisant de l'accroissement du taux de CO₂ de l'air sur les rendements est positif et même capable dans certains cas d'atténuer l'impact négatif du réchauffement (Jarvis et al., 2010).

En ce qui concerne les pays du Maghreb, la bibliographie fournit certaines études faites au Maroc (Touchan et al., 2011; Schilling et al, 2012) et en Tunisie (Lhomme et al, 2009; Mougou et al., 2011). Mais l'Algérie, le plus vaste pays de l'Afrique, du Bassin Méditerranéen et du monde arabe, n'a jusqu'à présent pas fait l'objet de travaux de ce genre.

Ainsi, à travers cette étude, nous nous proposons d'initier la recherche dans cette thématique en Algérie. Notre travail repose sur la contribution de différents organismes et structures scientifiques à savoir : l'UMR (Unité Mixte de Recherche) LISAH (Laboratoire d'Etude des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème) de Montpellier, Météo-France, l'ENSA d'Alger (Ecole Nationale Supérieure Agronomique), l'ITGC (Institut des Grandes Cultures) d'Alger

et de Sétif, l'ONM de Dar El-Beida (Office National Météorologique) et la Station Météorologique de Bordj Bou Arreridj.

Trois objectifs principaux sont ciblés dans cette thèse :

- 1- Etude du changement climatique en Algérie, par l'analyse du climat observé récent et celle du climat futur simulé par le modèle ARPEGE de Météo-France, sous le scénario A1B de l'IPCC.
- 2- Etude des performances d'un modèle de culture du blé dur et sa validation utilisant des données réelles de rendement.
- 3- Etude de l'impact du changement climatique futur (scénario A1B) sur le développement et le rendement de la culture de blé dur.

Deux régions différentes ont été choisies dans notre étude : Alger dans l'étage bioclimatique subhumide et Bordj Bou Arreridj, située dans les Hautes Plaines Est du pays et caractérisée par un climat semi-aride. Mis à part la représentativité des sites d'étude par rapport aux zones de production céréalière, notre choix s'est fait en fonction de la disponibilité de séries climatiques observées, sur une base journalière et d'une durée minimale de 20 ans.

Notre étude est réalisée en utilisant un modèle agro-météorologique simple et générique, qui fonctionne à l'échelle de temps journalière à partir de séries climatiques observées ou projetées. Il simule le bilan hydrique journalier du sol, l'évolution du cycle de développement de la culture et enfin son rendement. C'est en fait la combinaison, l'amélioration et l'adaptation de trois modèles précédemment développés à savoir : le modèle de bilan hydrique de Lhomme et Katerji (1991), le modèle de simulation du développement de la culture du blé dur de Lhomme et al. (2009) et le modèle de simulation du rendement de Sanabria et Lhomme (2013). Ce dernier modèle n'a pas été validé jusqu'à présent ; nous le faisons dans la présente thèse avec des données observées de rendement de blé dur.

Nous avons structuré cette thèse en trois parties principales :

- La première partie est une synthèse bibliographique composée de deux chapitres ; le premier présente le phénomène du changement climatique, donne son origine, ses causes et enfin les conséquences engendrées, tant dans le climat récent que celui projeté dans les 100 ans à venir, à travers tout le globe et particulièrement le bassin méditerranéen. Le deuxième chapitre apporte une information détaillée sur la modélisation et les modèles de culture, ainsi qu'une synthèse des résultats de recherches traitant la question de l'impact du changement climatique futur sur le

développement et le rendement des cultures, particulièrement sur le blé dur, tout en précisant les différences relatives à la localisation régionale.

- Dans la deuxième partie nous présentons et expliquons la démarche et l'ensemble des méthodes utilisées pour la réalisation de ce travail.
- La troisième partie est consacrée à la présentation des différents résultats ainsi qu'à leur interprétation. Elle débute par un premier chapitre qui concerne l'évaluation des performances du modèle de simulation de culture utilisé et sa validation. Il est suivi d'un deuxième chapitre consacré à l'étude et l'analyse des caractéristiques du climat récemment observé, ainsi que celui attendu dans le futur. Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats de la simulation et expliquons les impacts potentiels du changement climatique futur sur la culture du blé dur dans nos deux zones d'étude.

PARTIE I.

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre 1. Le changement climatique : observations et projections

1. Introduction

Le climat de la terre dépend de nombreux facteurs tels que la quantité d'énergie provenant du soleil, la teneur en gaz à effet de serre, aussi bien que des propriétés de la surface de la terre. Quand il y a modification de ces facteurs il y a modification de la quantité d'énergie absorbée ou réfléchiée dans l'espace, ceci provoque un réchauffement ou un refroidissement de la planète. Le changement climatique est le résultat en grande partie de l'activité humaine, en particulier de la production industrielle et de l'usage et de la couverture des sols. Ces types d'activités contribuent à une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, de méthane, d'oxyde nitreux et d'autres gaz à effet de serre ainsi que d'aérosols dans l'atmosphère, perturbant ainsi le bilan énergétique de l'enveloppe superficielle terrestre ainsi que ses bilans hydrologique et chimique (IPCC, 2013).

2. Variabilité climatique et changement climatique

Le système climatique terrestre se compose de l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la lithosphère (Horton et al., 2010). Ces composantes interagissent de manière très complexe et sur une grande échelle spatio-temporelle (Viner et al., 2006).

La variabilité du climat se réfère à la variabilité observée dans les données climatiques quand l'état du système climatique ne montre pas de changement (Mavi et Tupper, 2004). La variabilité dans une série climatique est marquée par une stabilité de la moyenne (la série est dite stationnaire), et par une fluctuation des observations autour de cette moyenne (Burroughs, 2001). A l'inverse, le changement du système climatique est caractérisé par un changement dans les moyennes des variables climatiques calculées sur une longue période d'années, qui peut être accompagné par un changement dans la distribution des fréquences des événements rares (Salinger et al., 2000).

3. Causes de la variabilité climatique et du changement climatique

Le changement climatique est le résultat d'une dynamique entre un ensemble de différents facteurs dont la contribution dépend surtout de l'importance de leurs actions dans le temps. Les causes du changement climatique peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

3.1. Causes d'origine naturelle

3.1.1. Périodicité astronomique

A long terme, l'orbite de la terre autour du soleil est influencée par l'interaction gravitationnelle de la lune et d'autres planètes à l'origine des « forces des marées » (Munk et al., 2002). Une perturbation de l'orbite terrestre est climatiquement très importante car elle contrôle la distribution saisonnière et latitudinale du rayonnement solaire (Burroughs, 2007). Elle peut entraîner des changements climatiques importants à différentes échelles de temps et est considérée d'après plusieurs études à l'origine de l'âge de glace (Mavi et Tupper, 2004 ; Viner et al., 2006).

3.1.2. Le cycle des taches solaires

La variation de la quantité d'énergie produite par le soleil est l'une des causes externes les plus connues du changement du climat de la terre (Burroughs, 2007). Le soleil manifeste des signes énergétiques variés sous forme de taches solaires connues sous le nom de « sunspots » (Viner et al., 2006). Ces taches solaires varient régulièrement en nombre, en taille et en durée (Burroughs, 2007), et sont positivement corrélées à la quantité d'énergie produite par le soleil (Eddy, 1976).

3. 1.3. Volcans

Les éruptions volcaniques explosives peuvent injecter dans l'atmosphère des millions de tonnes de poussière et de cendre (Viner et al., 2006). Cette poussière absorbe le rayonnement solaire et provoque donc un réchauffement des niveaux supérieurs de l'atmosphère (stratosphère), mais induit à l'inverse un refroidissement à faible altitude (Burroughs, 2007). L'éruption du Tambora au sud-est de l'Asie par exemple a causé un vaste refroidissement global et une « année sans été » en Europe (Engvild, 2003; Oppenheimer, 2003).

3.1.4. Les courants océaniques

Les courants océaniques jouent un très grand rôle dans le transport d'énergie à plus haute altitude, ce qui signifie que tout changement dans cette composante impliquera inévitablement

d'importants changements dans le climat (Burroughs, 2007). Ces changements peuvent avoir lieu à une échelle de temps décadaire tel que « l'Oscillation Pacifique Inter-décadaire » (Viner et al., 2006), mais peuvent aussi être quasi-annuels tel que « El-Niño/Southern Oscillation (ENSO) » et les « oscillations Nord Atlantique » (NAO) », où les variations de la température de la surface de la mer et du vent affectent dramatiquement le climat et par conséquent la biosphère (Nicholls, 1985 ; Ottersen et al., 2001 ; Gimeno et al., 2002 ; Tao et al., 2004).

3.1.5. La cryosphère

Le changement de la couverture globale de neige et de glace, mis à part la couverture neigeuse saisonnière, a une action sur le long terme (Mavi et Topper, 2004). Les observations depuis 1972 montrent que la couverture neigeuse de l'hémisphère nord a régressé depuis 1987, particulièrement au printemps (WMO, 1998). Cela a induit une diminution de l'albédo régional avec en conséquence une augmentation de la température hivernale dans l'hémisphère nord (Sirotenko, 1999).

3.2. Causes d'origine anthropique

3.2.1. Modification de la composition naturelle de l'atmosphère

3.2.1.1. Gaz à effet de serre (GES) ou « green house gases » (GHG) : Il est bien évident que le climat de la terre est étroitement lié à l'énergie reçue du soleil. La terre reçoit du rayonnement solaire dont une partie est absorbée, une partie est diffusée et une partie est réfléchiée par les aérosols, les nuages et les différents gaz qui composent l'atmosphère. Les océans, la lithosphère et la biosphère absorbent la majeure partie du rayonnement solaire qui atteint la surface : une partie est utilisée au niveau de la surface (réchauffement, évaporation, photosynthèse), l'autre partie étant réémise sous forme de rayonnement de courte ou grande longueur d'onde (rayonnement infrarouge).

L'atmosphère est naturellement composée d'un ensemble de gaz induisant une température d'équilibre de -18°C. Certains de ces gaz sont transparents au rayonnement solaire incident, mais opaques au rayonnement terrestre sortant, *il s'agit des gaz à effet de serre*, qui en dehors de la vapeur d'eau sont principalement : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Les changements intervenus depuis l'ère industrielle dans la composition chimique de l'atmosphère concernant ces trois derniers gaz sont désormais bien documentés (Fig. 1), et ces modifications apparaissent à la fois importantes et sans précédent au cours du dernier millénaire (Le Treut, 2003 ; Viner et al., 2006 ; Burroughs, 2007). Les

causes de cet accroissement étaient autrefois incertaines, mais récemment il a été confirmé que l'activité anthropogénique (utilisation de l'énergie fossile, extraction minière, activité nucléaire, déforestation, changements dans l'utilisation des terres) en est la raison prédominante (IPCC, 2013).

Le taux de CO₂ dans l'air est passé de 280 ppm (partie par million) en 1750 (avant l'ère industrielle) à 380 ppm en 2005, soit une augmentation de plus d'un tiers par rapport à l'ère préindustrielle (IPCC, 2001a). Le taux de CH₄ a augmenté de plus de 145 % au cours des 200 dernières années (WMO/GAW 116, 1998).

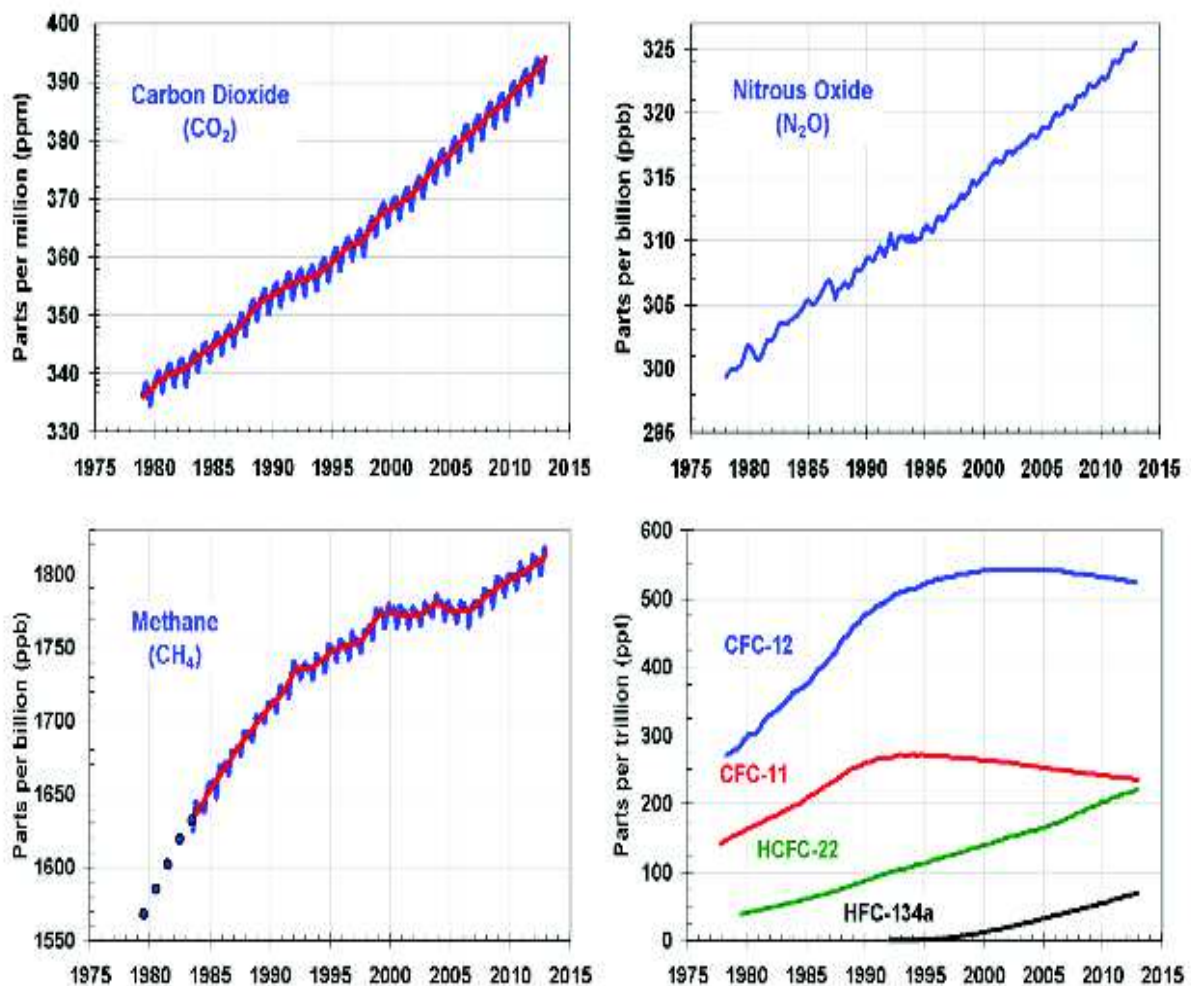


Fig. 1. Evolutions des concentrations de gaz carbonique (CO₂), de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O) et des principaux halocarbures (IPCC, 2007).

Le N₂O, avec de très faibles concentrations dans l'air (310 ppb), augmente lentement. Malgré sa faible concentration, il est considéré comme l'un des plus importants gaz à effet de serre du fait de son temps de séjour (Tableau 1) et de son pouvoir réchauffant (30 fois plus important que le CH₄) (WMO/GAW 116, 1998). L'effet global de cette accumulation de gaz en matière de forçage énergétique est une production supplémentaire de 2.4 W/m² depuis 1750 jusqu'à maintenant (Viner et al., 2006).

3.2.1.2. Les composés chlorés et combustion des énergies fossiles : les composés chlorés ou chlorofluorocarbones (CFCs) sont des gaz propulseurs d'aérosols qui sont utilisés principalement dans les fluides de nettoyage industriel et dans les équipements de réfrigération. Ils sont susceptibles d'épuiser la couche d'ozone stratosphérique dont la conséquence en est le développement continu du trou d'ozone dans l'antarctique (Burroughs, 2007).

En fait cette couche d'ozone permet d'absorber le rayonnement ultra-violet (Mavi et Topper, 2004) et son épuisement conduit inévitablement à une augmentation du flux de ce rayonnement au voisinage du sol, ce qui influe négativement sur tous les aspects de la vie organique.

L'utilisation des hydrocarbures et la combustion de l'énergie fossile quant à elle provoque le dégagement de dioxyde de soufre (SO₂), qui est converti dans l'atmosphère en acide sulfurique et forme alors des aérosols sulfatés qui peuvent être absorbeurs nets de l'énergie solaire réfléchi en surface.

Tableau 1. Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750.

	CO₂ (ppm)	CH₄ (ppb)	N₂O (ppb)	CFC-11 (ppt)	HFC-23 (ppt)	CF₄ (ppt)
Concentration préindustrielle (1750)	280	700	270	0	0	40
Concentration en 1998	365	1745	314	268	14	80
Temps de séjour atmosphérique (ans)		12	150	45	260	>50000

Source : Nefzi, 2012.

L'IPCC (2001a) estime que 75 % de l'augmentation du taux de CO₂ dans l'air a pour origine la combustion des carburants fossiles, 25 % est plutôt due aux nouvelles utilisations des terres. Le développement des surfaces agricoles et de l'élevage s'est fait aux dépens des forêts. Le changement de la surface terrestre, particulièrement le déboisement et la déforestation à grande échelle, a une incidence sur l'albédo et la rugosité régionale (Mavi et Topper, 2004), ce qui pourra affecter le transfert d'énergie, les ressources en eau et autres composantes du système climatique (Horton et al., 2010).

3.2.2 Changement dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre (land use and land cover change (LULCC)): l'activité humaine est à l'origine de la modification de la surface terrestre. Le développement des surfaces agricoles et de l'élevage s'est fait aux dépens des forêts. Le changement de la surface terrestre, particulièrement le déboisement et la déforestation à grande échelle, a une incidence sur l'albédo et la rugosité régionale (Mavi et Topper, 2004), ce qui pourra affecter le transfert d'énergie, les ressources en eau et autres composantes du système climatique (Horton et al., 2010).

4. Les changements observés dans le climat récent

Les sources polluantes industrielles et domestiques ont induit des modifications aussi bien quantitatives que qualitatives de la composition naturelle de l'atmosphère. En dehors des changements qui concernent les gaz à effet de serre, les composés chlorés et les résultats des combustions des énergies fossiles, d'autres modifications climatiques sont observées.

4.1. A travers le globe

Le quatrième rapport d'évaluation du changement climatique (IPCC, 2007) indique que la température du globe a augmenté de près de 0.74 ± 0.18 °C durant la période 1906-2005, et mentionne que cette augmentation est due principalement à l'augmentation de la concentration de l'air en gaz à effet de serre (Fig. 2). Au cours des 50 dernières années un réchauffement de l'ordre de 0.13°C par décennie a été observé et la période 1995-2006 comprend les 12 années les plus chaudes (IPCC, 2007).

Certaines recherches ont même mentionné que durant cette dernière période, le réchauffement dans l'hémisphère nord a atteint plus du double de celui dans l'hémisphère sud (Jones et Moberg, 2003). La température minimale a augmenté presque partout dans le monde et les températures maximale et moyenne ont augmenté en Asie (Gruza et al., 1999), en Australie et Nouvelle Zélande (Plummer et al., 1999), en Europe (Beniston, 1997), en Amérique du

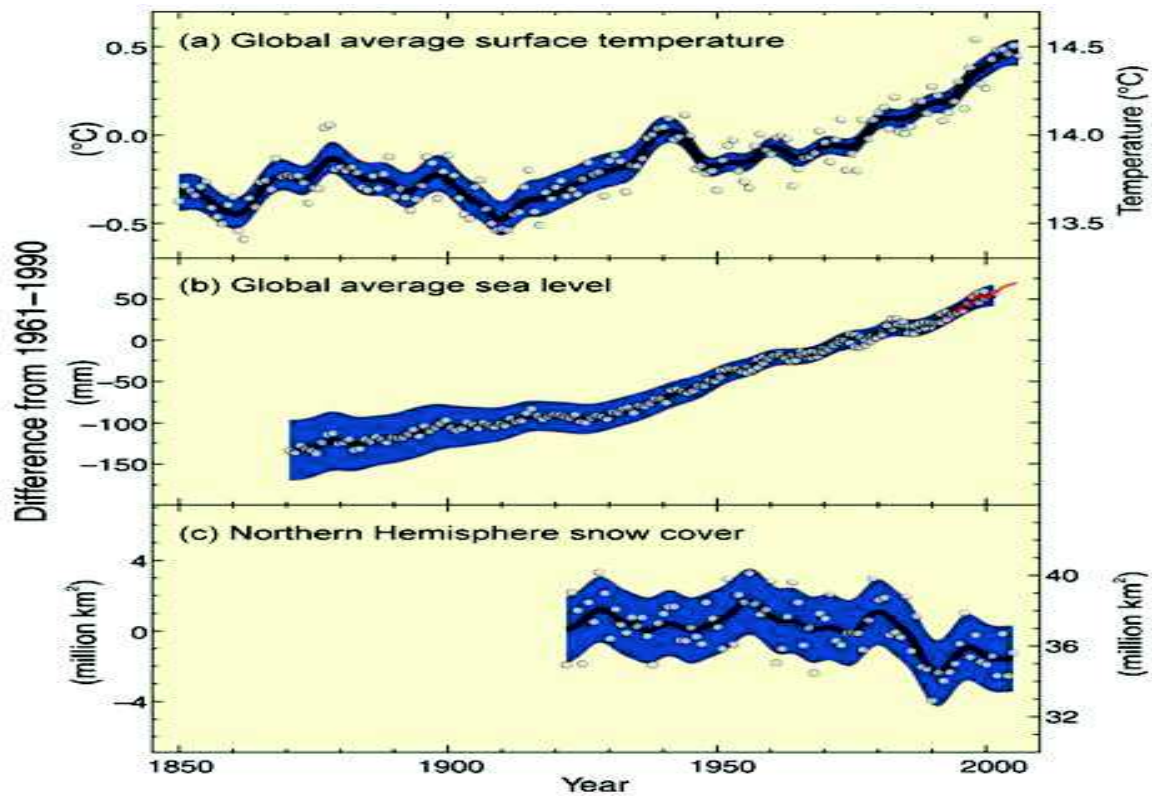


Fig. 2. Changements dans la température, le niveau de la mer et la couverture neigeuse de l'hémisphère nord (IPCC, 2007).

Nord (Cubasch et al., 1995; Robinson, 2000) et du Sud (Quintana-Gomez, 1999). Le continent Africain est plus chaud qu'il y a 100 ans (IPCC, 1996).

Depuis le second rapport d'évaluation de l'IPCC (IPCC, 1996), des centaines d'études ont été réalisées à l'échelle globale et régionale dont certaines révèlent des changements significatifs dans les précipitations, aussi bien en quantité qu'en distribution (Altava-Ortiz, 2011).

Une tendance à l'augmentation des précipitations a été mentionnée en Amérique du Nord (U.S. National Assessment, 2000), Argentine (Viglizzo et al., 1995), Australie et Nouvelle Zélande (Plummer et al., 1999). Une tendance à la décroissance des précipitations a été trouvée en Fédération Russe (Gruza et al., 1999), en Turquie (Türke, 1996), en Afrique (Hess et al., 1995; Mason, 1996) et en Chine (Zhai et al., 1999). Les changements concernant les précipitations varient entre le nord et le sud de l'Europe (Moonen et al., 2002).

Au cours du dernier siècle les deux hémisphères du globe ont connu une diminution dans l'enneigement net et dans la couverture glaciaire ainsi qu'une élévation décadaire du niveau

de la mer de l'ordre de 1.8 cm, qui atteint plus récemment 3.1cm/décade (IPCC, 2007). En termes d'évènement extrême, les sécheresses sont devenues plus fréquentes et plus longues en durée, les évènements relatifs aux pluies intenses sont devenus plus courants, les canicules et jours chauds sont devenus plus fréquents et plus intenses alors que la fréquence des évènements froids a régressé (Vincent et al., 2005; Alexander et al., 2006; Caesar et al., 2006; Haylock et al., 2005; Tebaldi et al., 2006, Marengo et Camargo., 2007, Marengo et al., 2009).

4.2. A travers le bassin méditerranéen et le nord de l'Afrique

La région méditerranéenne qui comprend la mer Méditerranée et ses surfaces côtières regroupe dix-huit pays. Elle peut être localisée approximativement entre 30°N-50°N de latitude et 10°W-40°E de longitude. Climatiquement elle est caractérisée par des températures moyennes, une dominance hivernale des précipitations et des étés secs (Wigley, 1992). La partie nord est relativement plus tempérée et humide alors que la partie sud, dont les pays du Maghreb, est plus chaude et sèche (Rosenzweig et Tubiello, 1997).

Sur la base des analyses du climat récent durant les 50 dernières années, la région méditerranéenne apparaît comme un point chaud (hot spot) possible dans les décades à venir (Kostopoulou and Jones 2005, Ventrella et al., 2012). Le changement climatique à travers cette région est caractérisé par une augmentation des températures, un accroissement de la fréquence d'occurrence des stress thermique et hydrique (sécheresse), et par une tendance négative concernant les évènements froids (IPCC, 2007 ; 2013).

Si les températures ont tendance à augmenter sur l'ensemble du bassin méditerranéen, les analyses statistiques du climat récent montrent que les précipitations changent différemment entre la partie nord et sud du bassin. Dès le début des années 1990, Førland et al. (1996) et Schonwiese et Rapp (1997) constatent une tendance positive dans le nord de l'Europe contre une tendance négative dans les régions sud. Dans la partie sud du bassin méditerranéen, de nombreuses études ont montré que les précipitations sont caractérisées par une plus grande irrégularité ainsi que par une fréquence plus faible des jours pluvieux, jumelée à une apparition plus fréquente des pluies torrentielles (Brunetti et al., 2002 ; Alpert et al., 2002). Cela a induit une tendance à la diminution des pluies mensuelles dans certaines zones (Sirangelo and Ferrari, 2003) et des pluies annuelles dans d'autres (De Luis et al., 2000).

Le changement du climat récent est différent en allant du Nord-Ouest au Nord-Est de l'Afrique. La température a une tendance générale à la croissance à travers toute la zone (Hertig et Jacobeit, 2008). Le climat observé dans la partie Nord-Ouest de l'Afrique montre

une tendance décroissante des précipitations (Gerstengarbe et Werner, 2007 ; Born et al., 2008). L'étude menée par Hamlaoui-Moulai et al. (2013) sur la période 19914-2004 en utilisant 21 stations localisées dans le nord-ouest de l'Algérie, confirme que cette zone est en effet la plus vulnérable en termes de décroissance des précipitations. A l'inverse, cette tendance n'est pas prononcée dans la partie nord-est, telle que le Nord-Est de l'Algérie (Meddi et Talia, 2008), la Tunisie méditerranéenne (Hertig, 2004) et la partie méditerranéenne de la Lybie et de l'Egypte (Hertig, 2004).

5. Modélisation du climat et scénarios futurs du changement climatique

Le rythme de l'opinion climatique est régi par les publications de L'IPCC, qui à travers ses rapports d'évaluation du changement climatique trace à chaque fois de nouvelles lignes pour ses activités. Les résultats présentés dans les différents rapports de l'IPCC sont basés sur les observations climatiques réelles ainsi que sur les sorties des modèles de simulation du climat.

5.1. Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des outils importants permettant d'interpréter les observations ainsi que les interactions entre les composantes climatiques, et d'estimer les évolutions à venir. Ce sont des modèles numériques qui intègrent une suite d'interprétations physiques des composantes climatiques ainsi que leurs différentes interactions essentielles pour reconstruire les grandes tendances climatiques semblables aux observations réelles. Les modèles climatiques analysent les processus climatiques sur la base de points grilles en trois dimensions, à travers lesquelles les flux de masse et d'énergie ainsi que leur stockage sont quantifiés par un ensemble d'équations.

Ces modèles permettent de simuler l'ensemble des réponses possibles de l'atmosphère, de l'océan, de la surface terrestre et de la glace marine aux différentes variabilités internes, naturelles et anthropiques. Les inputs de ces modèles comprennent à la fois des variables naturelles (telles que les variations dans le rayonnement solaire) et des variables anthropiques (telles que les émissions de gaz à effet de serre). On distingue deux types de modèles : les modèles globaux « GCM » et les modèles régionaux « RCM ».

Les modèles globaux connus sous le nom de « modèles de circulation globale » ou modèles de circulation générale » et désignés par le symbole « GCMs », sont des modèles basés sur des principes physiques robustes et capables de reproduire les conditions climatiques du passé récent ainsi que de prédire le changement climatique futur (IPCC, 2001, 2007 ; Pierce et al., 2009). Les modèles globaux couvrent l'ensemble du globe avec une faible résolution spatiale

(150-250 km). Actuellement, plus d'une douzaine de centres à travers le monde développent des modèles climatiques dans le but d'améliorer notre compréhension du climat et du changement climatique ainsi que pour appuyer l'activité de l'IPCC (Reichler and Kim, 2008). Toutefois, ces modèles climatiques ne sont pas parfaits, principalement parce que la compréhension théorique actuelle du climat est encore incomplète et une large gamme de processus environnementaux et terrestres reste encore incertaine, conduisant à une simplification et donc une erreur dans la prédiction.

Divers modèles ont été évalués par différents auteurs (Lin et al., 2006; Neelin et al., 2006; Chou et al., 2008; Cayan et al., 2009; Xavier et al., 2009) et il est actuellement admis que les GCMs fournissent une estimation quantitative crédible sur le changement futur du climat, particulièrement à l'échelle continentale (Jarvis et al., 2010). La fiabilité de ces estimations est plus élevée pour certaines variables (température) que d'autres (précipitation) (IPCC, 2007).

Les modèles régionaux désignés par le symbole « RCMs » recouvrent une partie seulement du globe et ont une plus haute résolution (50-20 km) ou un «maillage plus fin » sur la zone étudiée. La simulation des processus physiques (relief, trait de côte complexe, contraste terre-mer, îles) leur permet d'obtenir une représentation fine du climat. Toutefois, seul un certain nombre de facteurs sont représentés, comme les évolutions de l'atmosphère et de la végétation, alors que les caractéristiques de l'océan ne sont prises en compte que dans les modèles globaux (Hallegatte et al., 2008). Afin de conduire des études d'impact à une échelle plus fine, des modèles de circulation régionale peuvent être imbriqués à l'intérieur de modèle de circulation globale, c'est l'étape de la «régionalisation des données climatiques» (Fig. 3), (Burroughs, 2007). Il s'agit de raffiner spatialement les données climatiques en essayant de prendre en compte les hétérogénéités spatiales non ou mal prises en compte par les modèles climatiques globaux (relief, trait de côte, usage des sols) et de corriger par conséquent les distributions spatio-temporelles des variables climatiques d'intérêt de leurs défauts statistiques les plus pénalisants (Terray et al., 2012).

Deux approches existent en matière de méthodes de descente d'échelle (scaling-down) ; l'approche dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional et l'approche statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédictions des modèles.

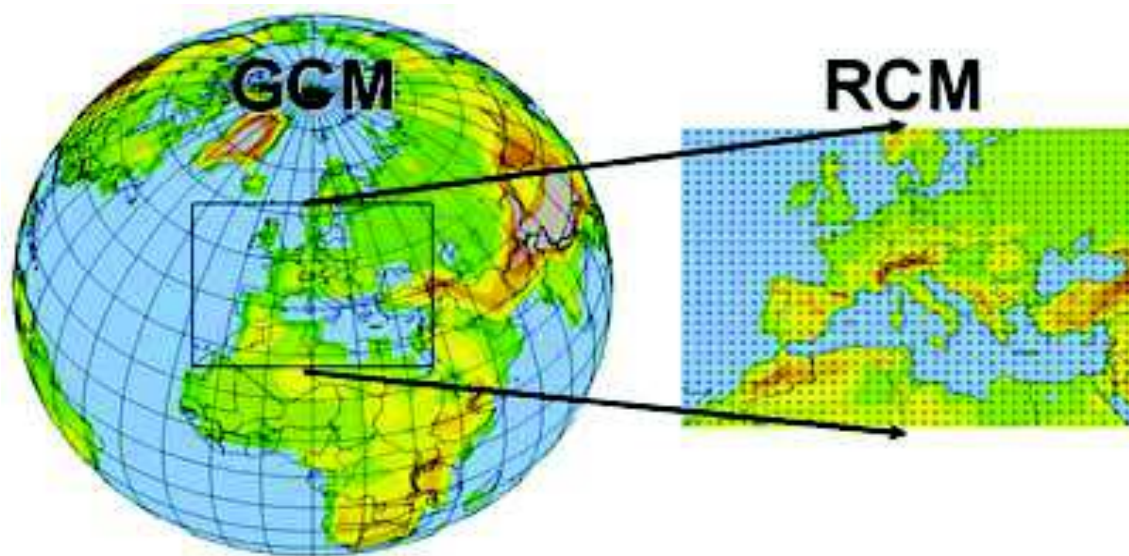


Fig. 3. Schéma de la méthode des modèles climatiques régionaux à grilles emboîtées (http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_fr/archives/57_2_fr/giorgi_fr.html)

5.2. Les scénarios futurs du changement climatique

L'activité anthropogénique est le principal moteur du changement du climat. Il n'y a pas de consensus global concernant la stratégie que va adopter le monde en terme de réduction de l'émission des GES, ni de consensus définissant exactement l'impact de cette réduction sur l'activité humaine actuelle (spécialement l'agriculture) (Jarvis et al., 2010).

L'estimation des changements futurs du climat ne peut se faire donc qu'à travers l'établissement de scénarios d'émission de GES. Un scénario est une description cohérente, structurée et plausible d'un état futur possible du monde (IPCC, 1996).

Ce ne sont pas des prévisions mais plutôt des images de la façon dont l'avenir peut se dérouler (Mavi et Tupper, 2004). Les scénarios d'émission sont conçus pour représenter un ensemble de différentes concentrations futures probables de GES, ainsi que différentes orientations politiques et économiques futures (Jarvis et al., 2010), qui sont les principaux outils des GCMs dans la simulation du climat futur (Viner et al., 2006). Entre 1990-1992, l'IPCC développe une première famille de scénarios d'émission «IS92» (Leggett et al., 1992), qui ont été largement utilisés dans la mise en œuvre des modèles climatiques et dans la détermination des impacts probables du changement climatique. Chaque scénario d'émission correspond à un ensemble particulier d'hypothèses sur la population totale future, le développement économique, et l'utilisation des terres et le changement de la couverture terrestre (LULCC). Avec l'accélération des changements climatiques observés et l'augmentation de la

concentration des GES, l'IPCC en 2000 a développé un ensemble plus adapté de scénarios appelés « scénarios SRES ». Dans le « Special Reports on Emission Scenarios » (Nakicenovic et Swart, 2000), les scénarios futurs ont été regroupés en quatre grandes familles, en se basant sur trois hypothèses principales: l'évolution démographique, le développement économique et social et le degré du développement technologique ainsi que son orientation (utilisation des énergies renouvelables). Ces quatre familles de scénarios sont organisées et hiérarchisées depuis ceux susceptibles de produire un haut forçage anthropique en raison de la forte utilisation de l'énergie combustible fossile jusqu'à ceux à faible forçage à cause de la réduction de la consommation et de l'introduction de nouvelles technologies plus efficaces. Les quatre familles de scénarios SRES peuvent être décrites en résumé comme suit:

– **Famille A1** : C'est la famille des scénarios les plus grands émetteurs en gaz à effet de serre. Elle fait l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios se divise en trois groupes qui correspondent à différentes évolutions technologiques du point de vue des sources d'énergie :

a/ à forte composante fossile (A1F1),

b/ non fossile (A1T)

c/ équilibrant les sources (A1B).

– **Famille A2** : elle décrit un monde très hétérogène basé sur l'autosuffisance et la préservation de l'identité locale. Elle est caractérisée par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques.

– **Famille B1** : elle décrit un monde convergent présentant les mêmes caractéristiques démographiques que la famille A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information et l'introduction de technologies propres et économes en ressources.

– **Famille B2** : elle décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissances démographique et économique, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Elle fait référence à un monde sobre en consommation énergétique et peu émetteur. Pour tous les scénarios SRES, l'émission de CO₂ augmente durant les premières décades du 21^{ème} siècle (Fig. 4). Cette tendance continue

jusqu'en 2100 dans les scénarios A2 et B2, alors que pour le reste des scénarios l'émission atteint un pic à partir duquel elle décroît.

5.3. Incertitudes liées à la prédiction du climat

L'incertitude est un problème important inhérent à toute projection du changement climatique (Carter et al., 2001; Arnell et al., 2004). Elle découle de trois sources différentes : incertitudes liées aux simplifications dans la représentation des différents processus physiques à l'intérieur des modèles climatiques, incertitudes dans les scénarios de forçage et incertitudes dans la modélisation de la réponse à un scénario donné.

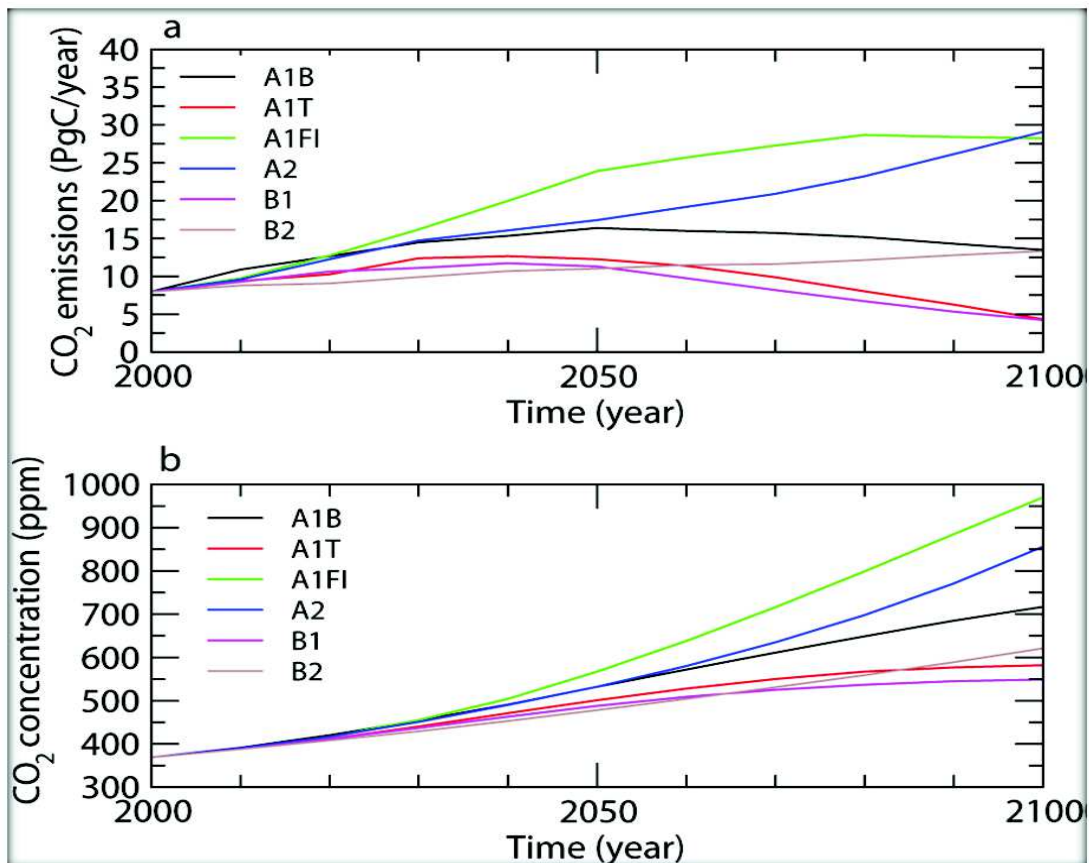


Figure 4. (a) Emission globale en Pg CO₂ par an (1Pg (Pentagramme) = 0.479 ppm)) et (b) concentration atmosphérique en CO₂ (en ppm) dans les six scénarios SRES de l'IPCC, 2000 (A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2) (IPCC, 2000).

5.4. Méthodes de correction des données climatiques simulées

Si l'on compare sur une période donnée et un espace donné, pour un paramètre donné, la moyenne des simulations climatiques à celle observée, on constate généralement un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certaines valeurs extrêmes sont assez mal reproduites, à cause des différents types d'incertitude déjà discutés (Terry et al., 2012). Les outputs correspondant à la période de référence (R) et aux scénarios futurs (S) des RCM doivent subir un post traitement par rapport aux observations réelles (O) pour donner naissance à de nouvelles données corrigées (R* et S*) pouvant être utilisées dans les études d'impact du changement climatique (Dequé, 2007).

Les méthodes de correction sont basées sur une fonction d'ajustement entre les données observées et simulées : l'idée est simplement de supposer que le modèle climatique régional prédit correctement le rang et non pas nécessairement la valeur d'une variable. La fonction d'ajustement pour une variable donnée (par exemple, les précipitations) est estimée pour le climat actuel en comparant les fonctions de distribution observée et simulée avant d'être ensuite appliquée aux projections climatiques. Pour une simulation à l'échelle du jour (j), les principales méthodes de correction sont :

- La méthode de confiance : $R^*(j) = R(j)$ et $S^*(j) = S(j)$, en fait aucune post-correction n'est appliquée. Si les sorties du modèle sont assez linéaires, cette approche est la plus appropriée.
- La méthode dite « delta ou des anomalies » : c'est la plus simple des méthodes de correction. Pour chaque variable climatique, des perturbations sont calculées mensuellement, comme le rapport (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous changement climatique et celui simulé pour le temps présent pris comme référence. Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément pour tout le mois considéré : $R^*(j) = O(j)$ et $S^*(j) = O(j) \times (S/R)$ ou $[+ (S-R)]$. Cette stratégie ne rend compte que du changement de climat moyen. Sa limitation principale est donc qu'elle ne permet pas de rendre compte des changements possibles de la fonction de distribution des variables climatiques à l'échelle journalière. Elle ne considère pas non plus les modifications éventuelles de la variabilité interannuelle.
- La méthode de débiaisage : cette méthode corrige l'erreur moyenne mais suppose que la variabilité du RCM est bonne : $R^*(d) = R(d) + (O - R)$ et $S^*(d) = S(d) + (O - R)$. L'avantage par

rapport à la méthode des anomalies est que cette méthode permet facilement d'avoir la variabilité climatique à l'échelle journalière dans certaines régions.

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

$R^*(d)=f(R(j)/O)$ et $S^*(j)=f(S(j)/O)$, avec f une fonction construite avec les données observées « O ». Cette méthode généralise la précédente et recouvre plusieurs techniques (régression, décomposition des valeurs singulières...). Dans la méthode de débiaisage, f est prise égale à $x-y$ avec x la donnée à corriger et y le biais ($R-O$). La méthodologie Q-Q sera développée ultérieurement dans le chapitre traitant les méthodes utilisées dans cette étude.

- La méthode des types de temps ou TT : $R^*(j)=O(j1)$ and $S^*(j)=O(j2)$, ou $j1$ et $j2$ sont des dates proprement choisies dans la série d'observation. Cette méthode regroupe des techniques analogues. La limite de cette méthode est qu'elle peut changer la fréquence des événements météorologiques sans pouvoir produire des événements jamais enregistrés, ce qui ne convient pas par exemple aux températures extrêmes estivales.

6. Les prédictions du climat futur

6.1. A l'échelle du globe

6.1.1. Températures

A la fois dans le TAR (Third Assessment Report) et le FAR (Fourth Assessment Report) de l'IPCC, les résultats des différents GCM (IPCC, 2001, 2007) indiquent que les températures futures du globe s'élèveront à un taux jamais connu autrefois (Tableau 2, Fig. 5). Ces augmentations sont de l'ordre de 1.8 °C, 2.8 °C et 3.4 °C respectivement dans les scénarios B1, A1B, A2 durant la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999 et en 2020 dans les scénarios sévères tels que A2 (IPCC, 2007). Une augmentation de la température de l'ordre de 2 °C sera atteinte dans la majeure partie des aires géographiques en 2050 dans la gamme de scénarios médium, Vers la fin du 21^{ème} siècle les prévisions avec le scénario moyen A1B indiquent que la quasi-totalité des régions tropicales sera touchée par une augmentation de température de l'ordre de 1.4 °C- 5.8 °C, les zones de hautes altitude et latitude seront plus touchées par cette augmentation que celles plus basses (IPCC, 2007).

Le niveau de la mer s'élèverait d'ici 2100 de 0.18-0.38 m selon le scénario le plus favorable B1 et de 0.36-0.59 m selon le scénario le plus sévère A1F1.

Tableau 2. Projection à un niveau global des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du 21^{ème} siècle.

Scénario	Variation de la température en °C		Elévation du niveau de la mer en m
	Valeur la plus probable	Intervalle probable	
B1	1.8	1.1-2.9	0.18-0.38
A1T	2.4	1.4-3.8	0.20-0.45
B2	2.4	1.4-3.8	0.20-0.43
A1B	2.8	1.7-4.4	0.21-0.48
A2	3.4	2.0-5.4	0.23-0.51
A1F1	4	2.4-6.4	0.26-0.59

Source : Quatrième rapport d'évaluation (FAR) de l'IPCC, 2007.

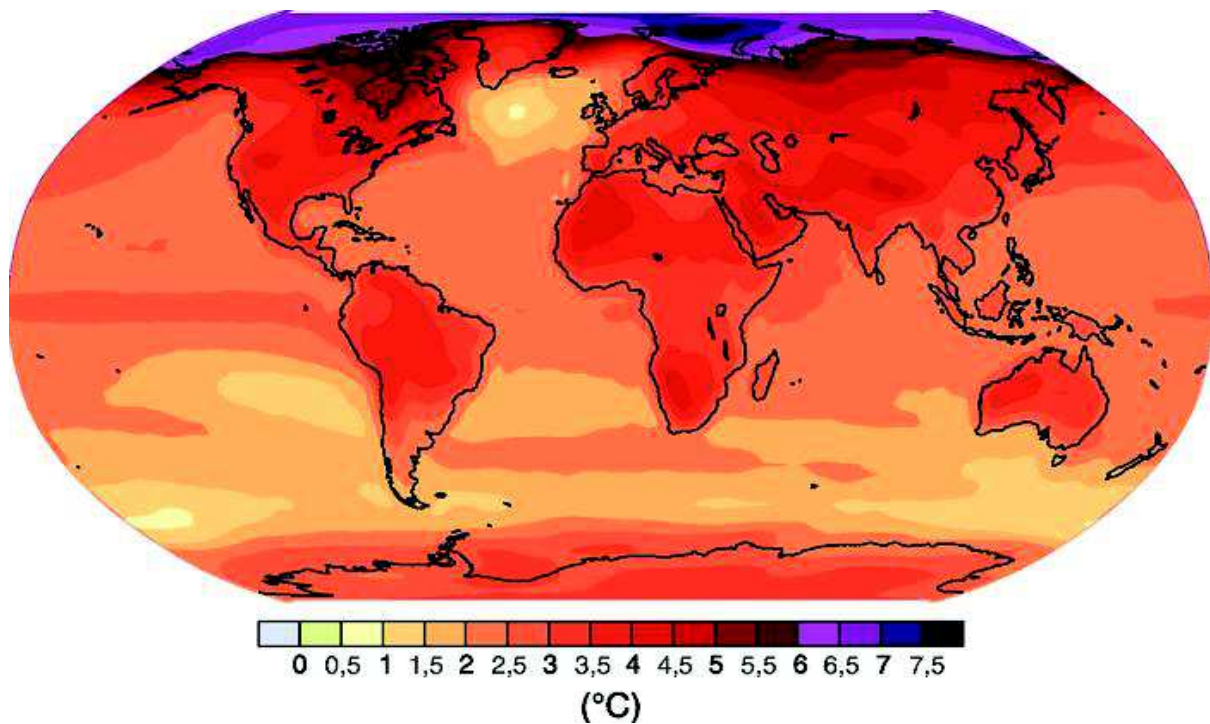


Fig. 5. Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues avec plusieurs modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan pour le scénario A1B du SRES (IPCC, 2007).

6.1.2 Précipitations

Les projections des changements des précipitations sont plus difficiles à réaliser du fait qu'elles sont déduites d'une plus large gamme de processus atmosphériques et dépendent beaucoup plus des mécanismes du GCM utilisés dans la simulation (Jarvis et al., 2010).

Cela conduit à d'importantes incertitudes dans les prédictions (Bates et Kundzewicz, 2008). La moyenne globale des précipitations est censée augmenter durant le 21^{ème} siècle du fait de l'augmentation des températures, ce qui induit une augmentation du taux d'évapotranspiration et donc du degré d'humidité atmosphérique (Viner et al., 2006). Le TAR (IPCC, 2001a) indique que la réponse de la moyenne globale des précipitations dans le scénario A2 durant les 30 dernières années du 21^{ème} siècle est 3.9% plus élevée en comparaison à la période 1961-1990. Le scénario B2, avec un plus faible forçage anthropogénique, répond avec un plus faible taux d'augmentation des précipitations (3.3%) pour la même période. Vers 2050, ces augmentations concerneront l'hiver dans les moyennes latitudes nord, l'hiver et l'été dans les hautes latitudes nord ; à de faibles latitudes, la variation serait plutôt régionale et peut-être positive ou négative Le FAR (IPCC, 2007), (Fig. 6).

6.13. Evénements extrêmes

Les modèles régionaux sont les plus appropriés pour évaluer la probabilité de changement dans les événements extrêmes. Alors qu'ils ont été largement appliqués en Europe et Amérique du Nord, dans d'autres zones telles que l'Afrique, l'Amérique Latine et certaines parties de l'Asie, les analyses régionales détaillées sont encore en nombre limité et dépendent principalement des projections des GCM (Solman et al., 2008; Nuñez et al., 2009). Cependant le changement climatique aura sans doute une influence sur l'intensité et la fréquence des épisodes secs et humides (Timmermann et al., 1999; IPCC, 2001, 2007; Ekström et al., 2005; Fowler et al., 2005; Blenkinsop and Fowler, 2007).

La compensation entre l'intensité et la fréquence des précipitations est attendue lorsque la pluviométrie totale annuelle tend à être maintenue dans le temps (c'est-à-dire une répartition le long de l'année d'événements pluviométriques plus rares mais plus intenses). Avec un très haut niveau de confiance, les projections relatives aux scénarios A1B indiquent un réchauffement extrême des saisons chaudes dans la quasi-totalité des régions terrestres du globe vers la fin du 21^{ème} siècle (IPCC, 2007), accompagné d'une augmentation de l'intensité des précipitations durant la période humide. Les prévisions des GCM montrent que vers la fin du 21^{ème} siècle, la probabilité des événements extrêmes chauds sera plus élevée que celle des

événements extrêmes froids et que la couverture neigeuse et l'extension de la glace vont diminuer encore plus (Horton et al., 2010).

Selon les régions, la hausse possible de l'intensité et de la variabilité des précipitations pourrait conduire à l'augmentation des risques d'inondation et de sécheresse (Hypatia, 2012). Selon les projections du l'IPCC avec le scénario SRES A2, en 2090, des périodes de sécheresses affectant des surfaces de 10 à 30 fois supérieures seraient probables, tandis que la fréquence et la durée moyenne des sécheresses seraient augmentées respectivement d'un facteur 2 et 6.

6.2. A l'échelle de la région méditerranéenne et du nord de l'Afrique

6.2.1. Température

Selon les prévisions de l'IPCC (2007) utilisant les scénarios A2 et B2, le réchauffement du continent européen durant les périodes 2020, 2050 et 2080 par rapport à la période 1961-1990 sera de l'ordre de 0.1 à 0.4 °C par décade. Les études montrent que le réchauffement vers la fin du 21^{ème} siècle pendant l'été dans les régions sud du continent sera deux fois plus important que dans le nord du continent (Rosenzweig et Tubiello, 1997 ; Hulme & Carter, 2000; Parry, 2000 ; Alpert et al., 2008).

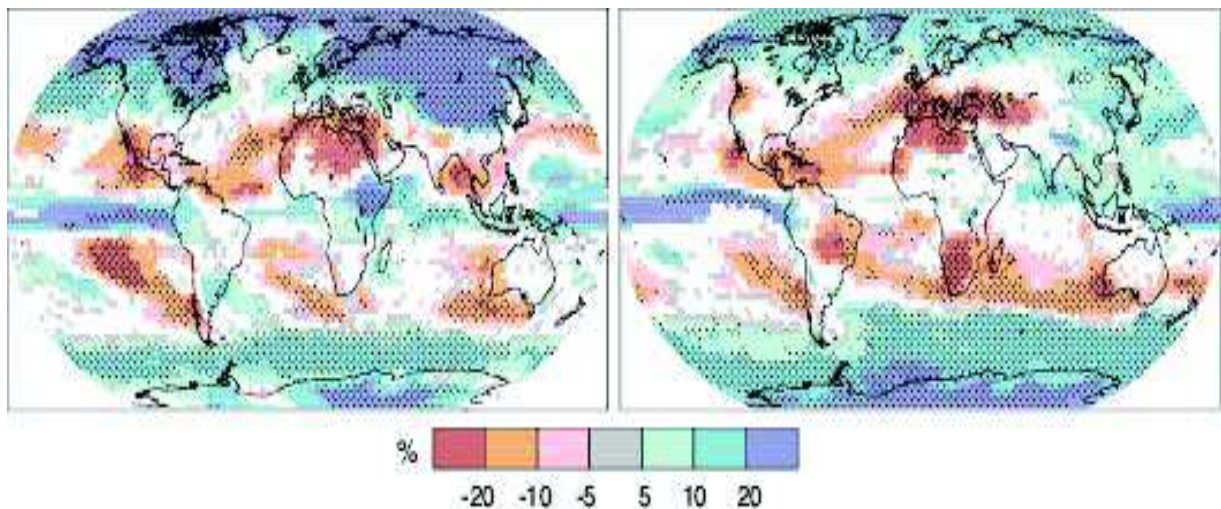


Fig. 6. Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de la variation et les zones en pointillé à celles où plus de 90 % des modèles concordent sur celui-ci (FAR (IPCC), 2007).

Les prévisions montrent en effet que la zone sud du bassin méditerranéen est l'une des zones les plus exposées au réchauffement climatique (Fig.7). En Afrique du nord, le modèle dynamique régional REMO prévoit une augmentation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C vers 2050 avec le scénario medium A1B (Paeth et al., 2009). L'application de différents modèles (régionaux et globaux) par Patricola et Cook (2010) au nord de l'Afrique montre un très étrange réchauffement de l'ordre de 6 °C à travers la zone ouest vers la fin du 21^{ème} siècle en comparaison avec le 20^{ème} siècle. Ces résultats sont devenus visibles à l'ouest de l'Afrique du Nord grâce aux analyses statistiques de Hertig et Jacobeit (2008b). Appliqué en Tunisie, le modèle ARPEGE de Météo- France avec le scénario A1B, prévoit un réchauffement moyen de 3.6 °C à la fin du 21^{ème} siècle (Lhomme et al., 2009).

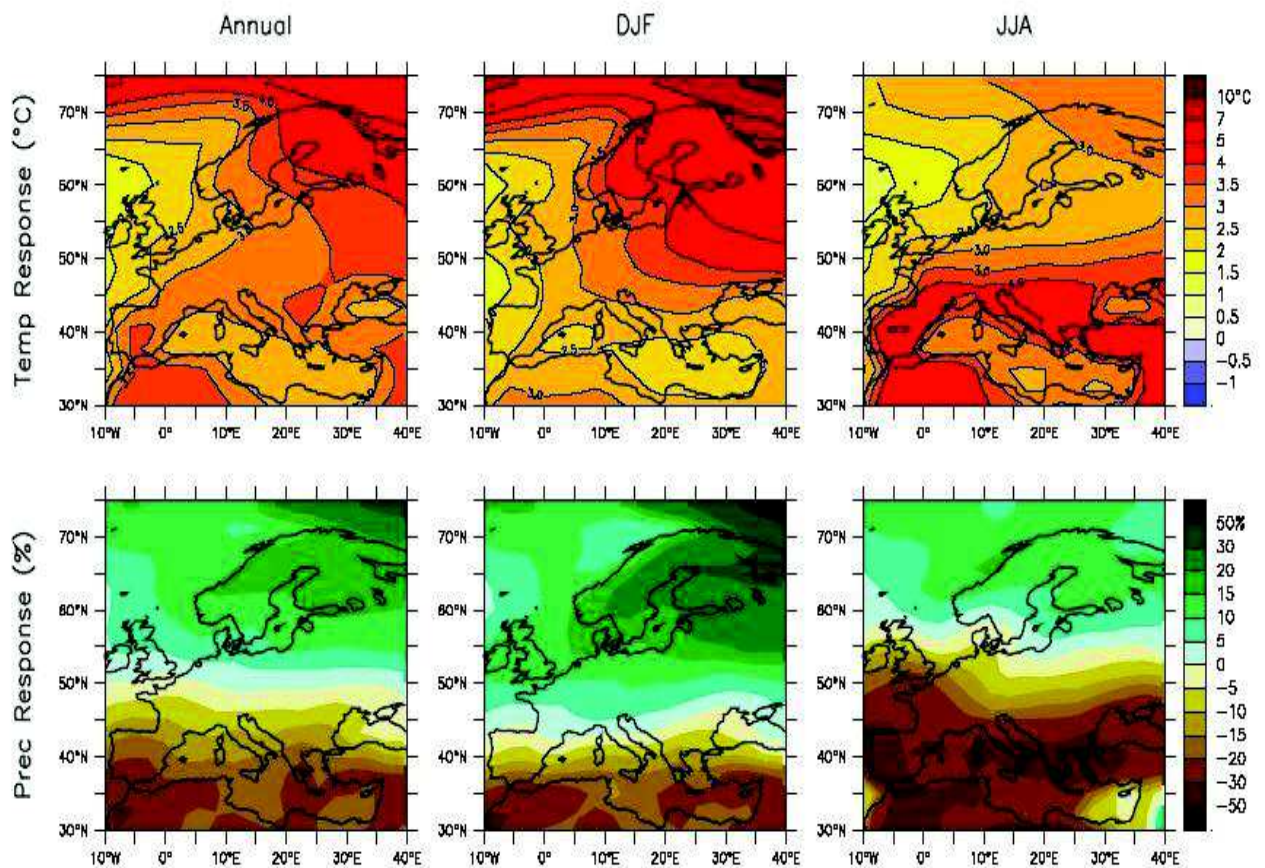


Fig. 7. Température (en haut, en °C) et précipitations (en bas, en %) attendues entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle selon le scénario A1B, en Europe et dans le bassin méditerranéen (à gauche, en hiver, à droite, en été) pour un réchauffement global de 3 °C (IPCC, 2007).

6.2.2 Précipitations

Au niveau de la zone méditerranéenne, les prévisions relatives au scénario A1B de l'IPCC (2007) indiquent une diminution des précipitations moyennes le long de l'année (Tableau 3), une diminution des jours de pluie ainsi que des périodes d'enneigement. Les changements attendus des précipitations annuelles et mensuelles entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle, en Europe et dans le bassin méditerranéen sont montrés dans la figure 7. Tous les modèles indiquent que la diminution des précipitations serait plus importante en été, de l'ordre de 24 % selon le scénario A1B et que les changements de précipitation seraient plus marqués à partir de 2050-2060 (Nefzi, 2012). Les régions sud du bassin méditerranéen seront marquées par une augmentation de l'irrégularité des précipitations ainsi que de la fréquence des événements pluvieux forts (IPCC, 2007).

A l'inverse, concernant la zone méditerranéenne nord-africaine, certaines projections utilisant un ensemble de simulations de modèles GCM (Giorgi and Lionello, 2008) et d'autres basées sur des traitements régionaux (Paeth et al., 2009) montrent une baisse des précipitations hivernales dans la région, et un climat futur avec des étés beaucoup plus secs (Viner et al., 2006).

Tableau 3. Résumé des résultats des 21 modèles globaux du GIEC sur le changement des précipitations pour la zone méditerranéenne calculés entre les périodes 1980-1999 et 2080-2099 pour le scénario A1B (IPCC, 2007).

Précipitation (%)					
	Min	25	50	75	max
Hiver (DJF)	-16	-10	-6	-4	-1
Printemps (MAM)	-24	-17	-16	-8	-2
Été (JJA)	-53	-35	-24	-14	-3
Automne (SON)	-29	-15	-12	-9	-2
Annuel	-27	-16	-12	-9	-4

Source : Nefzi, 2012.

6.2.3. Evénements extrêmes

Concernant les événements extrêmes, les prévisions de l'IPCC (2007) vers la fin du 21^{ème} siècle sont confirmées dans le dernier rapport de l'IPCC (2013). Ils peuvent être résumés comme suit :

- Le signal annuelle et saisonnier de sécheresse/réchauffement sur la région nord-africaine est une caractéristique constante dans les projections de changement climatique pour le 21ème siècle dans les scénarios A1B et A2 (Giorgi and Lionello 2008; Paeth et al. 2009; Patricola and Cook 2010; Barkhordarian et al. 2013).
- Température: la région devrait faire face à des vagues de chaleur plus longues, intenses et fréquentes, et des vagues de froid moins fortes et moins longues. La variabilité temporelle des températures en hiver se réduirait, tandis que la variabilité interannuelle des températures en été serait en hausse bien que l'incertitude sur cette évolution soit plus importante.
- Au niveau des extrêmes liés aux précipitations : le nombre de jours de pluie devrait diminuer, tandis qu'une incertitude plus grande existe en matière de précipitations intenses. La variabilité interannuelle à l'échelle mensuelle et annuelle serait en hausse, et l'intensité des extrêmes mensuels et annuels serait en diminution. De plus, les périodes sèches seraient plus nombreuses et plus longues.

6. Conclusion

Les premières études sur les gaz à effets de serre, leurs causes anthropiques et leurs conséquences se mettent en place dans les années 1960. Ceci conduit dans les années 1970 à une prise de conscience des changements climatiques liés aux gaz à effets de serre qui aboutit en 1988 à la création du GIEC. Ce regroupement de climatologues a travaillé à l'établissement de scénarios d'émission de gaz à effets de serre basés sur l'évolution des politiques mondiales sur la question des ressources énergétiques. Les scénarios les plus étudiés actuellement sont les scénarios A2, A1B et B1, respectivement pessimiste, neutre et optimiste en termes de réchauffement climatique. Les forçages radiatifs établis à partir de ces tendances socio-économiques servent ensuite de supports à la modélisation des mouvements atmosphériques au sein de modèles climatiques globaux. Ces derniers arrivent à donner une image sur l'évolution du climat dans le futur, mais avec un degré élevé d'incertitude. Le passage à l'étape de la régionalisation a permis de minimiser ces incertitudes, et l'augmentation du nombre d'études régionales dans le domaine du changement du climat permet chaque jour de faire avancer la recherche dans cette thématique et d'améliorer la compréhension des tendances climatiques futures.

Les résultats obtenus par les modèles climatiques globaux et régionaux montrent que le changement climatique sera différemment réparti à travers le globe. Il est bénéfique dans certaines régions, mais désavantageux dans d'autres. C'est le cas des régions sud-méditerranéennes et nord-africaines, qui semblent être potentiellement vulnérables dans le contexte du changement climatique futur. Dans cette zone, ce changement est caractérisé par une augmentation de la température dépassant les seuils du globe, une diminution des précipitations et une augmentation de la fréquence d'occurrence des événements extrêmes. Tous ces résultats conditionnent sans doute le développement économique dans la région déjà en difficulté, chose justifiant la présente étude et soulignant son importance.

Chapitre 2. Modélisation des cultures et impact du changement climatique sur la culture du blé dur

1. Introduction

Les systèmes agricoles sont intimement liés au climat. Ils sont d'une part affectés par la dérive de son état moyen et par sa variabilité, et sont d'autre part des contributeurs nets à la composition chimique de l'atmosphère et influencent le cycle énergétique du climat (Fig. 8). D'une manière générale, le changement climatique est susceptible d'avoir un impact direct sur les cultures, par des changements dans leur environnement de croissance, mais aussi indirectement à travers des changements dans la dissémination des maladies et ravageurs des plantes, dans la fertilité des sols et dans la biodiversité agricole.

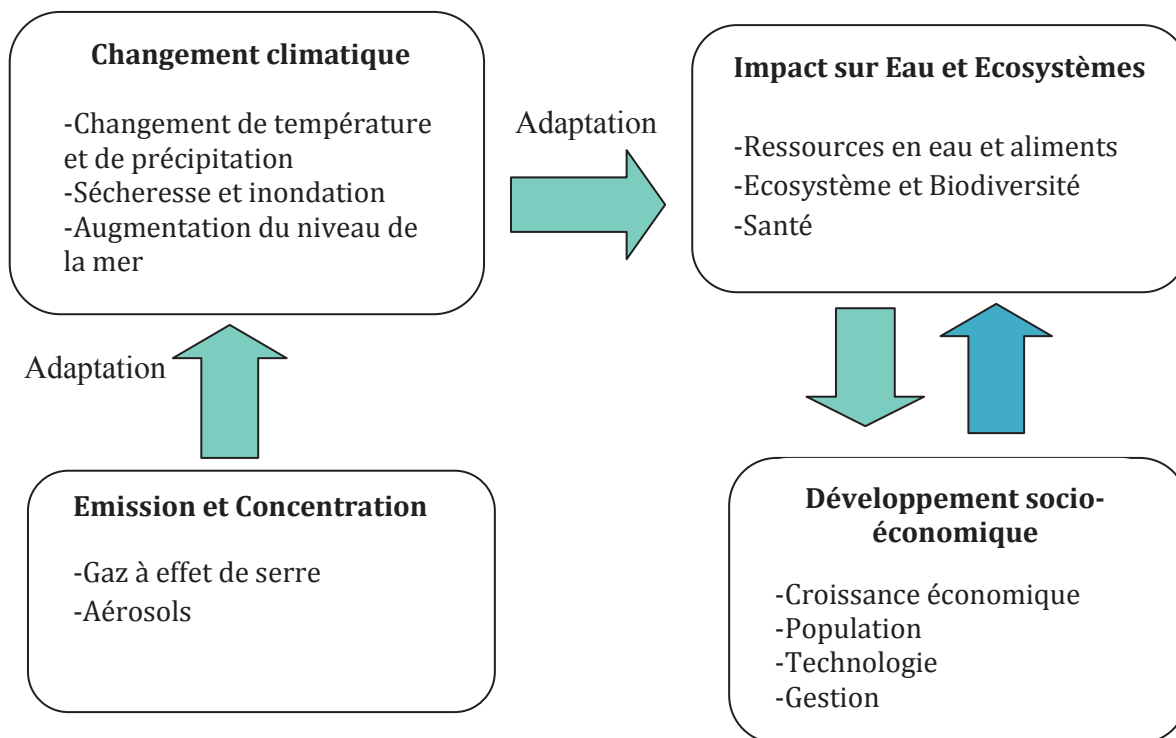


Fig. 8. Descriptif de l'impact du changement climatique par l'IPCC (source : [http //www.lenntech.fr/effet-de-serre/ipcc-sres-causes.htm](http://www.lenntech.fr/effet-de-serre/ipcc-sres-causes.htm)).

L'évolution du climat au cours des prochaines décennies aura donc un impact, très variable selon les régions, sur la production agricole et la répartition géographique des cultures. En effet, les changements climatiques peuvent être bénéfiques pour certaines régions et nuisibles pour d'autres. Mais les pays et les régions les moins développés (Krishnan et al., 2009), notamment dans le continent africain (Mertz et al., 2009), sont susceptibles de connaître les pires conséquences du changement climatique, du fait de leur dépendance à l'agriculture pluviale, mais surtout parce qu'ils sont pauvrement équipés pour pouvoir s'adapter .

L'élaboration de stratégies d'adaptation aux changements climatiques devient absolument indispensable. De telles stratégies requièrent cependant une meilleure compréhension de l'impact observé du climat récent et de l'impact potentiel du climat futur, information procurée essentiellement par les modèles de simulation de la croissance, du développement et du rendement des cultures.

2. Simulation et modélisation

2.1. Importance de l'outil de simulation

Simuler veut dire imiter et reproduire et la simulation existait depuis l'origine de la civilisation. L'homme, pour survivre, a en effet dû inconsciemment utiliser la simulation de processus futurs. Un modèle est une simple description d'un système, aussi bien qu'une abstraction de la réalité (Swain et al. 2006, 2007). Un modèle peut se définir aussi comme une représentation simplifiée et idéalisée de la réalité, construite sur la base d'un ensemble ordonné d'hypothèses relatives à un phénomène observable et mesurable, et ayant pour but de reproduire au mieux le comportement du système réel étudié, en fonction de la problématique posée et des objectifs du modélisateur (Coquillard et Hill, 1997).

L'utilisation de modèles offre plusieurs avantages vis-à-vis de l'expérimentation en conditions réelles. Par exemple, dans une simulation, il est facile de modifier les variables exogènes et le paramétrage du modèle et ainsi contrôler l'environnement de simulation. En outre, les modèles permettent de simuler des écosystèmes complexes mettant en jeu de nombreuses interactions entre les composantes constitutives du système et avec les facteurs biotiques ou abiotiques du milieu (Thornley, 2001). Aussi, la simulation peut souvent fournir une information que l'expérimentation seule n'aurait pas pu offrir, parce que contrainte par le temps et les ressources nécessaires. Cela est particulièrement vrai dans les études d'impacts

du changement climatique où la modélisation est un moyen évidemment nécessaire pour répondre aux questions de recherche posées (Thornley, 2001; Soussana et al., 2010).

2.2. Classification générale des modèles

Selon les types de classification, les modèles peuvent être: conceptuels, physiques ou mathématiques (Acock et Acock, 1991). Ils peuvent aussi être déterministes ou stochastiques, dynamiques ou statiques, mécanistes ou empiriques (Graux, 2011).

Un modèle déterministe est un modèle dont les prédictions ne reposent pas sur des distributions de probabilité, contrairement aux modèles stochastiques dont les prédictions intègrent de fait un caractère aléatoire (Thornley, 2001). Un modèle dynamique utilise généralement un ensemble d'équations différentielles fonctions du temps, alors qu'un modèle statique est par définition indépendant du temps (Thornley, 2001). Un modèle empirique est construit sur la base d'équations statistiques ou mathématiques qui n'ont pas pour but d'être explicatives des processus modélisés mais juste d'être prédictives (Hammer et al., 2002). Ces équations sont établies sur la base de régressions à partir de données expérimentales (Hammer et al., 2002). A contrario, un modèle mécaniste est basé sur une certaine idée de comment le système fonctionne, sur les éléments à considérer comme importants dans la modélisation et sur les interactions qui lient ces derniers (Krishnan et al., 2009).

Afin d'étudier les interactions et interdépendances entre les éléments du système, les modèles de simulation systémiques sont dynamiques, le plus souvent déterministes et mécanistes (Graux, 2011). Ils sont organisés sur la base de sous-modèles et consistent en un ensemble (parfois considérable) de variables d'état, d'équations et de paramètres. Ces modèles sont à même de considérer beaucoup de facteurs en lien avec le système étudié et permettent de dégager le comportement d'ensemble du système en réponse à ces facteurs.

2.3. La démarche dans la modélisation

La figure 9 résume les principales étapes de la modélisation. L'élaboration d'un modèle dépend étroitement des objectifs du modélisateur (et de la problématique de l'étude) ainsi que de sa connaissance du système étudié et des données expérimentales dont il dispose. L'ensemble de ces contraintes permet de définir les échelles spatiale et temporelle du modèle, le niveau de détail (i.e. les processus à modéliser) et la méthode de modélisation à employer (Coquillard et Hill, 1997). L'utilité de l'introduction d'une complexité additionnelle dans les modèles n'est pas évidente (Hakanson, 1995), la vraie vertu du modélisateur résidant dans sa

capacité à représenter le système étudié avec parcimonie. Très souvent, l'échelle d'étude choisie (spatiale et temporelle) oriente les concepteurs de modèles vers une approche essentiellement descriptive (modèles empiriques) ou bien au contraire principalement explicative (modèles mécanistes) des processus identifiés comme important à modéliser pour l'échelle d'étude considérée (Bolte et al., 2006).

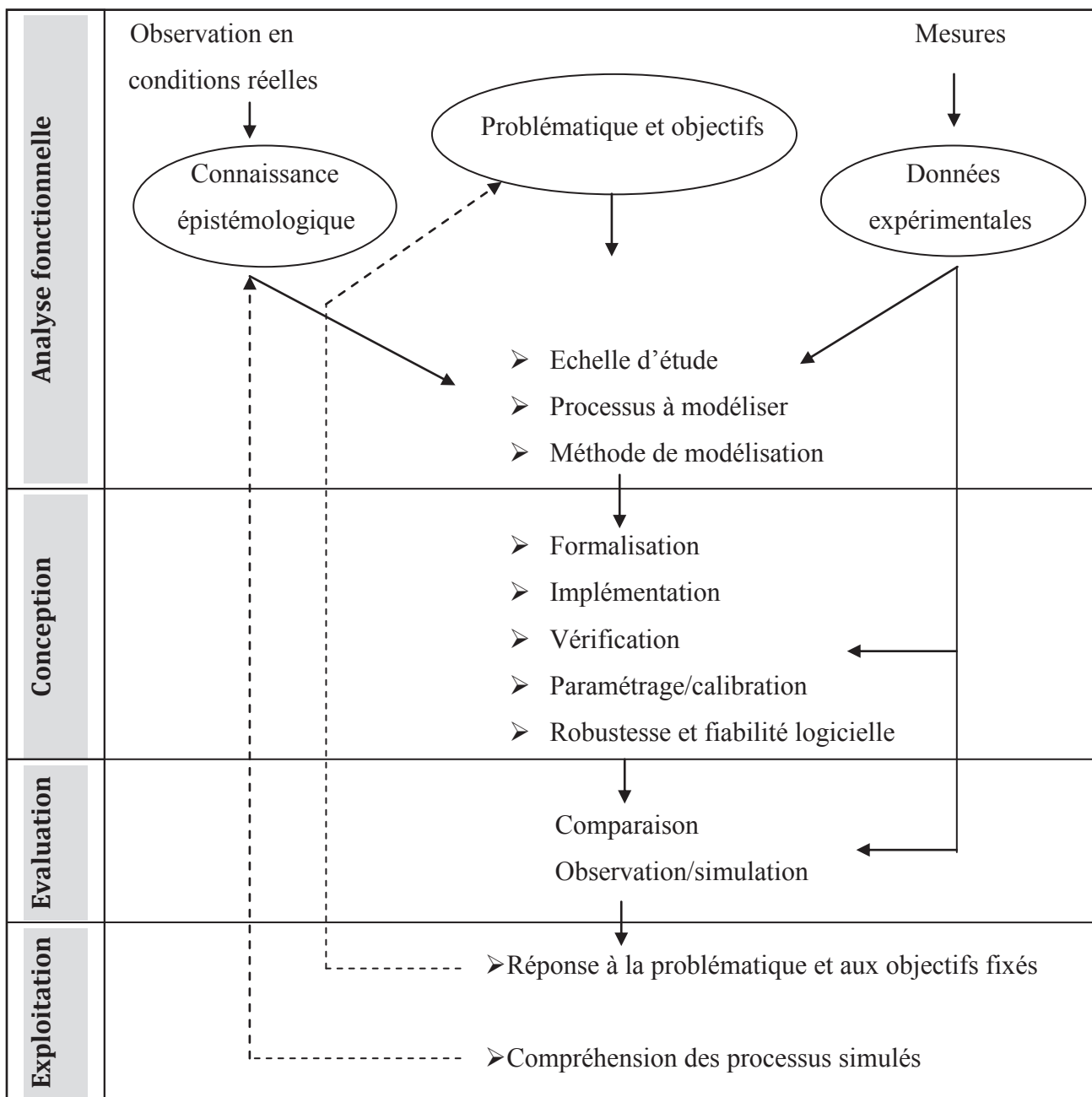


Fig. 9. Etapes de la démarche de modélisation (d'après Coquillard et Hill, 1997).

Cela conditionne aussi souvent le degré de complexité de ces modèles. La connaissance du système est également déterminante pour le choix de la représentation du fonctionnement du système. Ainsi, dans les situations pour lesquelles les mécanismes sont encore peu compris, des modèles essentiellement empiriques peuvent fournir des prévisions plus fiables que des modèles complexes (Bolte et al., 2006).

Une fois le modèle conçu, il convient d'évaluer ou « critiquer » ses sorties (Thornley, 2001). Cette étape est essentielle à la démarche de modélisation et repose sur la comparaison des valeurs simulées aux données expérimentales. La validation d'un modèle vise à quantifier les situations (e.g. pédoclimatiques) où les prédictions de ce modèle sont « valides », c'est-à-dire proches des observations mesurées en conditions réelles. Cela permet de définir le domaine de validité du modèle ainsi que sa robustesse. Une fois le modèle évalué voire validé, les valeurs simulées peuvent servir à appréhender le fonctionnement des systèmes étudiés et à répondre à la problématique posée.

3. Les modèles de culture

3.1. Description, classification et utilisation

Les sciences des cultures et des plantes représentent une intégration de plusieurs domaines (biologie, physique et chimie, climatologie), et les modèles de simulation des plantes et des cultures sont une représentation mathématique de ce système complexe (Hoogenboom, 2000). Les modèles de culture comptent parmi les outils les plus utilisés et les plus efficaces de tous les domaines de la recherche agronomique. Le développement de nouveaux modèles de culture et l'amélioration ainsi que l'adaptation de ceux déjà existants, continuent cependant d'être l'une des principales préoccupations des études agronomiques.

Les modèles de cultures, appelés aussi « modèles écophysologiques », sont des outils qui utilisent des descriptions mathématiques des processus physiologiques, chimiques et physiques, en regroupant le maximum de connaissances disponibles sur la plante (physiologie, environnement, conduite de la culture) dans l'objectif de prédire la croissance, le développement et le rendement de la plante dans le temps et dans des conditions environnementales spécifiques (White et Hoogenboom, 2010). Les modèles de culture sont physiologiquement basés sur le principe de relations causales entre les différentes fonctions de la plante et son environnement, mais en réalité ils ne peuvent pas prendre en compte toutes les interactions entre l'environnement et le système modélisé et par conséquent, peuvent

inclure des hypothèses, en particulier lorsque l'information concernant certains aspects du système est insuffisante, incomplète ou inexistante (Hoogenboom, 2000). Selon la discipline scientifique, il existe différents types de modèles, allant de modèles très simples basés sur une seule équation à des modèles extrêmement avancés qui comprennent des milliers d'équations. Ainsi, les modèles de culture peuvent être classés comme suit :

a- Les modèles de croissance

Ils comprennent des représentations mathématiques simplifiées de mécanismes physiques, chimiques et physiologiques complexes en relation avec la croissance de la plante. Ils sont principalement utilisés dans des applications de la recherche, mais ne sont pas très pratiques pour les applications agricoles, vu leur complexité et la nécessité de nombreux paramètres d'entrée (Richie, 1998).

b- les modèles agro-météorologiques

Ce sont des modèles qui fournissent une information journalière sur le déroulement de la réponse de la plante à une sélection de variables météorologiques en fonction du temps (Baier, 1979). Les modèles agro-météorologiques comptent parmi les approches simples en matière de simulation des cultures, basées sur l'utilisation des variables agro-météorologiques comme entrée clé (Hoogenboom, 2000). Leur succès dépend fortement de leur habilité à quantifier l'influence du climat, du sol et des conditions de culture dans la simulation du développement, de la croissance et du rendement de la culture (Hansen et Jones, 2000). Ils sont utilisés opérationnellement dans de nombreuses régions du monde pour le suivi de l'effet des conditions climatiques sur la croissance des cultures et pour la prévision des rendements à une échelle régionale et continentale (Challinor et al., 2004; Hansen et al., 2004; Nemecek et al., 1996; Thornton et al., 1997; Vossen and Rijks, 1995; Yun, 2003).

c- Les modèles statistiques

Dans ces modèles, une ou plusieurs variables représentant le climat, les caractéristiques du sol ou le temps sont statistiquement ou empiriquement liées au rendement ou à d'autres paramètres cultureux (Baier, 1979; Ritchie, 1998).

d- Les modèles empiriques

Ces modèles comprennent des équations ou des relations empiriques pour représenter les différents processus complexes de la plante et leurs interactions avec l'environnement (Baier,

1979; Ritchie, 1998). Parmi les utilisations majeures des modèles de culture figurent l'amélioration de l'information concernant la croissance des plantes dans des conditions environnementales données, et la prévision de l'impact du changement climatique futur sur cette croissance. En effet ces modèles sont l'outil dominant dans les études d'impact du changement climatique sur les agrosystèmes dans le troisième et le quatrième rapport de l'IPCC (Gitay et al. 2001; Easterling et al., 2007).

3.2. Chronologie et évolution

Les études concernant les modèles de culture ont débuté vers 1960 et s'orientent actuellement vers une phase pratique (Wang et al., 2002; Li et Lu, 2000; Li et al., 2003).

Les premiers modèles de cultures simulaient simplement l'évolution de la photosynthèse et du bilan de carbone en fonction du temps (Hoogenboom, 2000). Ils ont été utilisés comme base de recherche pour tester des hypothèses de base sur la croissance des plantes (Loomis et Rabbinge, 1979). D'autres processus, tels que le développement végétatif et reproductif et le bilan hydrique, ont été rajoutés par la suite (Duncan et al., 1967; Curry, 1971; Curry et Chen, 1971; Splinter, 1974). Avec le développement de l'informatique et l'amélioration de la compréhension des processus physiques de base, de nouveaux facteurs ont été considérés, tels que la dynamique de certains nutriments dans le sol et dans la plante ainsi que l'effet des maladies et ravageurs (White and Hoogenboom, 2010).

L'« Ecole de De Wit » (De Wit et Goudriaan, 1974; Bouman et al., 1996), définit quatre niveaux concernant l'évolution des modèles de culture. En phase 1, la température et le rayonnement solaire sont utilisés comme entrées pour simuler la croissance et le développement et pour calculer la production potentielle. La croissance dans ce cas ne comprend que la simulation du bilan de carbone. En phase 2, les précipitations et irrigations sont rajoutées comme entrées, et le système parvient ainsi à simuler le bilan hydrique du sol. En phase 3, la teneur du sol en azote est rajoutée comme entrée pour simuler la croissance et le développement, le bilan hydrique ainsi que le bilan d'azote. En phase 4, d'autres entrées sont rajoutées, tels que maladies, ravageurs et mauvaises herbes. A cette phase, le système complet est simulé, y compris les interactions avec la plupart des composantes biotiques et abiotiques. Etant donné la complexité du système sol-plante-atmosphère, il n'existe que quelques modèles de culture qui fonctionnent à la phase 4 (Hoogenboom, 2000).

3.3. Organisation et conception

Comme le montre la figure 10, dans un modèle de culture, la simulation commence par l'introduction d'une série de données spécifiant les conditions initiales environnant la culture, le statut hydrique initial dans le sol, et les paramètres nécessaires pour représenter les caractéristiques physiologiques de la culture.

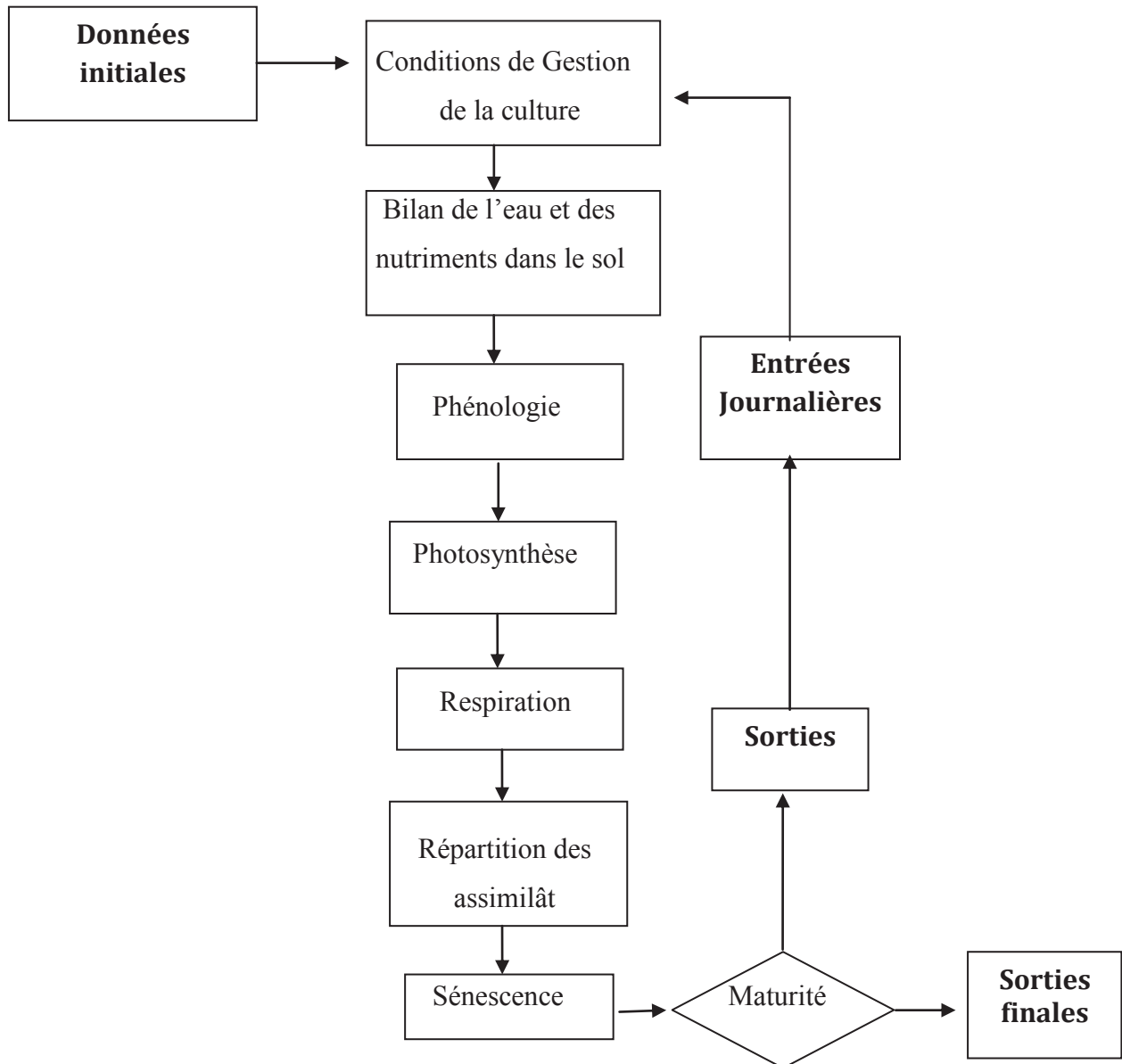


Fig. 10. Organigramme schématisé d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier (source : White et Hoogenboom, 2010).

Pour une culture annuelle, le modèle parcourt une série de sous-programmes (appelés « subroutines »), qui simulent les processus de la plante ou du sol à un pas de temps horaire ou journalier, émettant en sortie des valeurs intermédiaires à intervalles spécifiés. Les « subroutines » les plus souvent rencontrées dans un modèle sont: (a) le calcul de la phénologie de la plante en fonction de l'accumulation de température et de la photopériode, (b) calcul de l'accumulation de la matière sèche, (c) calcul du partage et de l'allocation de la matière sèche aux différents organes de la plante, (d) calcul de l'effet des facteurs environnementaux (paramètres climatiques, bilan de l'eau et des nutriments dans le sol), (e) conditions de gestion de la culture, (f) caractéristiques des cultivars utilisés.

3.3.1. Développement

La phénologie est la chronologie d'apparition des différents organes (Prévot, 2012). Le développement comprend les processus utilisés par la plante pour gérer les changements importants de la croissance tels que la levée, la formation des fleurs, le début de formation et la croissance du grain, et la fin de la formation du grain qui correspond généralement à la maturité.

White et Hoogenboom (2010) expliquent que chaque phase de développement d'une plante est caractérisée par une durée exprimée en temps physiologique, mathématiquement similaire au temps thermique, degré-jours de croissance ou unités de chaleur, l'effet de la photopériode, de la vernalisation ou d'autres processus pouvant être inclus. La manière de modéliser la phénologie dépend de la biologie de l'espèce cultivée et de la décision du modélisateur concernant la représentation de ses réponses spécifiques. Dans le cas de la température, les décisions concernent la spécification d'une courbe qui décrit la forme supposée d'une réponse physiologique donnée. Les hypothèses communes sont que chaque plante est caractérisée par une température basse appelée « zéro de végétation », au-dessous de laquelle la croissance s'arrête, et une température optimale permettant un taux maximum de croissance. Entre ce seuil et ce plafond, la croissance est proportionnelle à la température, ainsi l'accumulation d'un certain nombre de degrés-jours aboutit à la définition d'une somme de température (Soltner, 1978). Chaque phase phénologique est en fait caractérisée par une somme de température nécessaire à sa réalisation.

3.3.2. Croissance

La croissance est décrite principalement par l'accumulation de matière sèche dans les principaux organes de la plante (White et Hoogenboom, 2010). L'une des approches les plus

utilisée pour simuler l'accumulation de matière sèche, consiste à supposer que la croissance nette journalière est le produit du rayonnement photosynthétiquement actif (*PAR*) intercepté par le couvert et un facteur de conversion, représentant l'efficacité d'utilisation du rayonnement (*RUE*) par le couvert (Sinclair et Muchow, 1999 ; Sandaña et Pinochet, 2011.). Cette approche a pour base les travaux de Monteith (1977). L'efficacité d'utilisation du rayonnement (*RUE*) peut être modélisée en fonction de la température, du taux de CO₂ ou d'autres stress spécifiques (White et Hoogenboom, 2010).

3.3.3. Répartition des assimilât et rendement

La matière sèche accumulée est fournie aux différents organes de la plante à travers un ensemble de règles de répartition qui changent avec le développement, mais parfois aussi avec les différents niveaux de stress. L'approche la plus simple consiste à simuler l'allocation d'assimilats vers les organes reproductifs par une relation linéaire fonction de l'indice de récolte (Harvest Index HI) (Spaeth and Sinclair, 1985; Steduto et al., 2009a; Sanabria et Lhomme, 2012; Sandaña et Pinochet, 2011).

La simulation du rendement réel (Y_a) par rapport au rendement maximum (Y_m) est souvent inspirée du modèle linéaire de base développé par Doorenbos and Kassam (1979).

3.3.4. Environnement

3.3.4.1. Bilan hydrique

Les processus de base concernant la simulation du bilan hydrique dans le sol sont globalement décrits par un équilibre entre d'une part les gains en eau représentés par les précipitations (P), les irrigations (I), le stock d'eau dans le sol (S), les remontées capillaires à partir de la nappe phréatique (C), et les pertes en eau qui comprennent les pertes par évaporation (E) et par transpiration (T), le ruissellement de surface (R), et la percolation profonde ou drainage (D). Ainsi :

$$(P + I + S + C) = (E + T + R + D) \quad (1)$$

Les paramètres P , I sont principalement prédéterminés. Les paramètres R et C sont souvent négligés. Ils sont très dépendants des caractéristiques spécifiques du terrain de culture et sont par conséquent très variables et difficiles à estimer à une échelle régionale. Pour estimer E et

T , les modèles calculent premièrement la demande atmosphérique en eau (ET_0) à partir des variables climatiques et certaines conditions qui concernent le couvert végétal. La forme adaptée de l'équation de Penman–Monteith pour le calcul de l' ET_0 (Monteith and Unsworth, 1990) constitue la base du modèle le plus généralement utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration de référence ET_0 décrite dans le bulletin de la FAO N° 56 (Allen et al., 1998). De nombreuses variantes sont cependant proposées en fonction de la disponibilité des données climatiques d'entrée (Allen, 1986). Le passage de l' ET_0 à l'évapotranspiration d'une culture donnée ET_c se fait par le biais du coefficient cultural K_c dont la valeur pour une même culture varie en fonction du stade de développement (Allen et al., 1998). L'évapotranspiration réelle ET est inférieure à ET_c , si les conditions d'alimentation hydrique ne sont pas optimales. Ces dernières dépendent à la fois du taux d'humidité disponible pour la plante à différents niveaux d'enracinement, mais aussi de la distribution des racines dans le sol (White et Hoogenboom, 2010).

Le stockage de l'eau dans le sol S est positif lorsque l'humidité de l'eau dans le sol augmente et négatif lorsqu'elle diminue. Le calcul du bilan de l'eau dans le sol est complexe, en partie à cause de la nécessité de tenir compte des propriétés du sol qui varient avec l'enracinement et l'itinéraire technique (Ritchie, 1998).

3.3.4.2. Bilan de nutriments

Des approches similaires à celles du bilan hydrique sont utilisées dans la modélisation du bilan d'azote et de nutriments, avec des adaptations concernant la conversion du nutriment sous sa forme absorbable dans la solution du sol (White et Hoogenboom, 2010). Dans le cas de l'azote, cela nécessite de simuler sa minéralisation et sa mobilisation, qui à son tour exige le suivi de l'ammonium, du nitrate et de la matière organique du sol (Godwin et Singh, 1998). Le taux de minéralisation de l'azote est proportionnel au taux de labilité de l'azote organique dans le sol et dépend de la température du sol et de sa teneur en humidité (Aslyng et Hansen, 1982; Addiscott, 1983).

3.3.4.3. Paramètres climatiques

Comme il été montré antérieurement, les paramètres climatiques tels que la précipitation, la température, le rayonnement solaire, la concentration de l'air en CO_2 , l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent affectent directement les différents processus de la plante. Les

variables climatiques figurent généralement sous forme d'entrées journalières. Leurs effets sont estimés progressivement à travers la simulation des différents processus de la plante discutés antérieurement (Tableau 4).

3.3.5. Itinéraire technique, gestion de la culture et caractéristiques des cultivars

Les modèles de simulation des cultures une fois calibrés et validés pour un type de culture et de cultivar sont capables de simuler l'effet de la période et date de semis et des pratiques culturales (irrigation, fertilisation et travail du sol...) sur le développement et le rendement d'une culture donnée (Matthews, 2002). La gestion de la culture est généralement simulée à travers des options en entrée, qui offrent la possibilité de modifier certains facteurs tels que le semis, la fertilisation, le travail du sol ou l'irrigation. Dans certains modèles, l'effet des irrigations ainsi que son optimisation sont simulés à travers le calcul d'un facteur dit « efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (White et Hoogenboom, 2010). L'application de la fertilisation est caractérisée par la date d'application, la quantité et le type de nutriments à apporter et la profondeur d'incorporation de ces nutriments (White et Hoogenboom, 2010). Les caractéristiques des cultivars sont généralement regroupées en un ensemble de paramètres, parfois appelés « coefficients génétiques » censés les différencier, concernant la composition et la croissance du grain, la taille relative de la feuille, la phénologie (durée des phases phénologiques), la réponse à la photopériode, les besoins en vernalisation et autres caractéristiques (White et Hoogenboom, 2010).

Tableau 4. Effets d'une sélection de facteurs environnementaux sur les différents processus de la plante et leur utilisation dans la modélisation.

Facteur	Processus
Température	Phénologie, Photosynthèse, Respiration, Développement de la feuille, Croissance en phase de reproduction, Elongation, racinaire, Evapotranspiration potentielle, Minéralisation de la matière organique du sol
Concentration en CO ₂	Développement, Photosynthèse, Respiration, Transpiration, Développement de la feuille
Rayonnement solaire	Photosynthèse, Développement de la feuille, Evapotranspiration potentielle
Vent	Evapotranspiration potentielle,
Humidité relative	Développement de la feuille, Evapotranspiration potentielle, Transpiration

Les paramètres des cultivars sont estimés par ajustement des valeurs simulées à celles réellement observées, ce qui nécessite l'accès à une large gamme de données de terrain où la moindre lacune peut affecter la précision de la calibration (Anothai et al., 2008a ; Guerra et al., 2008).

3.4. Méthodologie d'application dans les études d'impact du changement climatique

L'impact du changement climatique sur les cultures se retrouve dans une large gamme d'études (Rosenzweig et Parry, 1994; Riha et al., 1996; Carlson et al., 1996; Podestá et al., 1999; Kaiser et al. 1993; Reilly et al., 2003; Parry et al., 2004). Les plantes naturelles et cultivées sont toutes affectées par les différentes composantes du changement climatique, y compris l'augmentation du taux de CO₂ de l'atmosphère (Kimball, 1983; Bazzaz, 1990; Jablonski et al., 2002; Norby et Luo, 2004), l'augmentation de la température (Ferris et al., 1998; Challinor et al., 2005) et la combinaison de ces deux derniers facteurs avec le déficit hydrique (Asseng et al., 2004). La réponse d'une culture donnée au changement climatique étant étroitement liée à la variabilité du climat régional (IPCC, 2013), les conditions climatiques futures peuvent être avantageuses dans certaines régions et pour certaines cultures, mais désavantageuses dans d'autres cas (Lavalle et al., 2009).

La simulation de la culture dans des conditions climatiques futures n'est pas plus difficile que celle faite dans les conditions réelles ou historiques. L'approche la plus commune consiste à générer des données météorologiques futures avec des modèles climatiques, puis à les utiliser comme entrées des modèles écophysologiques pour simuler la croissance, le développement et le rendement des cultures dans les conditions futures (Francisco et Silva, 2009; White and Hoogenboom, 2010). L'impact du changement climatique est exprimé à travers le changement absolu ou relatif dans la productivité et l'utilisation des ressources de la culture (Meza et Silva, 2009). Le choix du modèle de culture dans une étude d'impact dépend du type de culture et des processus simulés par le modèle. Parmi les modèles de culture les plus utilisés pour appréhender l'impact du changement climatique sur les céréales, principalement sur le blé dur, on trouve les modèles CERES (Adams et al., 1988; Rosenzweig et al., 1993; Adams et al., 1999; Jonesa, 2003, Ventrella et al., 2012) et CropSyst (Pala et al., 1996; Tubiello et al., 2000; Anwara et al., 2007; Giannakopoulos et al., 2009 ; El Afandi et al., 2010; Sommer et al., 2013).

4. Les Impacts attendus du changement climatique sur la culture de blé dur

Le blé est la source alimentaire la plus importante, à la fois du point de vue consommation et production (Tilman et al., 2002). Avec le riz et le maïs, il forme la base de la nutrition alimentaire mondiale humaine et animale (Evans et Fischer, 1999). Les projections basées sur la croissance de la poussée démographique (supposée atteindre les 3 milliards d'humains) suggèrent une augmentation de la production et de la productivité totale du blé de 50 % dans les 30 à 40 années qui viennent : sa souplesse en termes d'utilisation alimentaire et d'adaptabilité signifie que son importance devrait augmenter dans le futur et qu'il viendra prendre la place de certaines autres céréales, particulièrement le riz en Asie (Porter et al., 2007). Cela devrait se réaliser dans des conditions climatiques futures caractérisées par une concentration de l'air en CO₂ pouvant atteindre les 1000 ppm, (IPCC, 2013) engendrant un effet fertilisant estimé à 28 % (Oleson et Bindi, 2002), mais aussi par des températures plus élevées et des sécheresses plus fréquentes et plus sévères (IPCC, 2013).

Afin d'appréhender l'impact possible des différentes composantes climatiques futures sur cette culture de première importance, de nombreuses études ont été menées dans différentes régions à travers tous les continents (Ghaffari et al., 2002; Qunying et al., 2005 ; Scott et Maxwell, 2007 ; Xiao et al., 2008 ; Yunzhou et al., 2010; Moriondo et al., 2011; Croitoru et Holobaca, 2012; Sommera et al., 2013). Dans ce qui suit, nous allons détailler la réponse du développement et de la production de la culture de blé dur aux principales conditions climatiques projetées, à savoir l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'air, l'augmentation de la température et la variabilité du régime pluviométrique et de la fréquence des événements extrêmes.

4.1. Impacts du réchauffement futur

Chez les graminées, la croissance foliaire repose sur la vitesse d'apparition des feuilles successives sur les talles (Gillet, 1979), ainsi que sur la vitesse d'élongation et de sénescence des feuilles ; et la colonisation du milieu se fait par tallage. Dans les conditions naturelles de la période automne-hiver-début de printemps, Lemaire (1987) a montré que la réponse de l'élongation foliaire à la température était de nature exponentielle. L'accélération de l'élongation foliaire est liée au passage des apex du stade végétatif au stade reproducteur. La date à laquelle cette accélération se produit est fonction de la vernalisation des talles et est variable selon le génotype considéré. Cette accélération de l'élongation foliaire s'accompagne

d'une augmentation de la capacité photosynthétique des feuilles. Alors que la réponse de la vitesse d'apparition des feuilles à la température reste inchangée, cette accélération se traduit par une augmentation importante de la taille (et donc de la surface) des feuilles. Conjugée à l'augmentation de la densité des talles, cette augmentation de la surface foliaire contribue à une augmentation rapide de l'indice foliaire, à une plus grande captation de l'énergie solaire et donc à une accélération de la production de matière sèche. Cependant les fortes températures peuvent aussi limiter la croissance des graminées.

La température moyenne à la surface du globe devrait augmenter de 1.4 °C à 5.8 °C durant la période 1900-2100 (IPCC, 2001). L'augmentation de la température aura des effets différents en fonction de son interaction avec d'autres composantes du changement climatique et suivant l'espèce.

Des températures au-delà de celles attendues durant la saison de croissance auront de sévères conséquences sur la culture, et peuvent avoir des impacts dramatiques sur la production finale lorsqu'elles surviennent durant les stades clés du développement, même si le reste des conditions de croissance est bon (Moriondo et al., 2011). En effet les températures élevées peuvent perturber les capacités photosynthétiques de la plante. Si l'optimum thermique de la plante est dépassé, la fertilité des épis de certaines cultures décroît fortement (Seguin et Stengel, 2002; Seguin et al., 2004a).

Les études indiquent que l'intensité des réponses des phases phénologiques des cultures aux changements climatiques est variable dans l'espace et dans le temps (Menzel et al., 2001; Wang et al., 2008). Elles montrent que généralement l'augmentation des températures induira un raccourcissement du cycle de culture des différents cultivars (Sayre et al., 1997). Concernant le blé, l'augmentation des températures tend à réduire la longueur du cycle de croissance induisant une plus faible interception de la radiation avec en conséquence une diminution de l'absorption du rayonnement et donc du rendement en grain (Mearns et al., 1997; Van Oijen et Ewert, 1999). L'étude menée par Wang et al. (2008) au nord-ouest de la Chine a montré que le réchauffement confirmé durant la période 1981-2004 dans la région, a induit une précocité des stades post-montaison, floraison et maturation du blé dur, de 13,2, 11 et 10,8 jours respectivement, induisant une diminution du rendement en grain. Au Mexique, un réchauffement de 1.7 °C a induit une précocité du stade floraison de 11 jours, une diminution de la biomasse et du rendement en grain (Asseng et al., 2004). Utilisant 5 scénarios climatiques différents dans le sud de l'Italie, Ventrella et al. (2012) montrent que le raccourcissement de la phase végétative (semis-floraison) est considérable (supérieur à 30 jours), alors qu'il est insignifiant (de 3 à 4 jours) durant la phase reproductive (floraison-

maturation). Le réchauffement futur à travers le Bassin Méditerranéen raccourcit le cycle de croissance du blé dur (Guereña et al. 2001; Giannakopoulos et al., 2009; Moriondo et al. 2011; Ventrella et al., 2012). La conséquence de ce raccourcissement sur l'accumulation de biomasse et sur le rendement en grain ne sera négative qu'à partir d'un réchauffement de 2 °C (Tubiello et al., 2000; Ferrise et al., 2011; Ventrella et al., 2012).

4.2. Effets d'une atmosphère enrichie en CO₂

L'une des manifestations les plus marquantes du changement climatique est l'élévation du taux de CO₂ dans l'air, qui est passé approximativement de 280 ppm à 379 ppm durant le dernier siècle et qui est censé atteindre 570 ppm en 2050 (IPCC, 2007).

Cette hausse aura un effet bénéfique sur le couvert végétal en favorisant l'activité photosynthétique des plantes. L'étude de Seguin (2002) montre qu'une augmentation de 20 à 30 % conduirait à une assimilation nette de 10 à 20 % plus élevée en fonction du métabolisme photosynthétique. Différentes recherches ont montré l'effet fertilisant de l'augmentation du taux de CO₂ sur la croissance des cultures et leur rendement. A travers plusieurs études menées dans des serres et chambres de culture, Kimbal et Ido (1983) ont montré que la croissance des plantes et leur rendement augmentent typiquement de plus de 30 % avec un doublement de la concentration en CO₂ de l'air de 330 ppm à 660 ppm. Une concentration élevée en CO₂ influe positivement sur le taux de croissance et la photosynthèse, mais provoque une décroissance de la conductance stomatique (Saha et al., 2012). L'élévation du taux de CO₂ dans l'air induit une élévation du taux de croissance de la biomasse et du rendement des plantes du type C₃ (Centritto et al., 2002; Drake and González-Meler, 1997; Li et al., 2003).

Chez le blé dur, l'augmentation du taux de CO₂ provoque deux effets différents : une augmentation du taux de CO₂ intercellulaire induisant une augmentation de la photosynthèse, et la réduction de la conductance stomatique provoquant une réduction de la transpiration dont le résultat est une croissance de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Farquhar et al., 1978). L'élévation du taux de CO₂ (700 ppm) accélère le taux d'élongation de la tige et le développement du limbe chez le blé dur (Seneweera et Conroy, 2005). Les différentes études portant sur l'effet de l'enrichissement de l'air en CO₂ sur le blé montrent par contre une large variation de la réponse de l'accumulation de la biomasse et du rendement (Bender et al., 1999; Dijkstra et al., 1999; Pinter et al., 1996). Ceci s'explique par le fait que le rendement final est déterminé par plusieurs processus qui sont potentiellement modifiés de différentes

manières en fonction des différentes conditions de CO₂ et de température (Morison et Lawlor, 1999).

Le LAI est le principal facteur de contrôle de l'interception/absorption du rayonnement par les couverts végétaux et de l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) (Saha et al., 2012). Avec un enrichissement du couvert végétal en CO₂, on a observé une augmentation de l'indice de surface foliaire LAI (Batts et al., 1998; Mulholland et al., 1997, 1998). La concentration élevée en CO₂ peut potentiellement faire augmenter le LAI, induisant ainsi la stimulation de la RUE (Long and Drake, 1991). Manderscheid et al. (2003) rapporte que l'assimilation journalière de carbone chez le blé est linéairement corrélée à l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif. Ils trouvent que la RUE moyenne saisonnière augmente par enrichissement en CO₂, induisant une augmentation de la biomasse finale et du rendement en grain. Toutefois, on a trouvé que cet effet positif de l'élévation du taux de CO₂ sur la biomasse régresse vers la fin de la période de croissance (Fangmeier et al., 1996; Mulholland et al., 1997; Pinter et al., 1996). En effet, l'effet de l'augmentation du taux de CO₂ sur la photosynthèse est positif avant la floraison et il semblerait que cela changerait la relation gains-pertes du CO₂ dans l'élaboration du rendement en grain (Manderscheid et al., 2003).

4.3. Incidence des événements extrêmes

Mis à part l'élévation de la température moyenne du globe et du taux de CO₂ dans l'atmosphère, le climat futur sera caractérisé par un accroissement de la fréquence des événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses, et par des changements consistants dans la distribution régionale des températures et des précipitations (IPCC, 1996). Dans plusieurs régions du monde, la fréquence des événements pluvieux extrêmes a augmenté, et de grands changements dans les températures extrêmes a été observé au cours des 50 dernières années (IPCC, 2007; Marengo et al., 2007). Certaines régions, dont le bassin méditerranéen, sont plus concernées que d'autres par ces changements (IPCC, 2013). En effet, les fréquences de stress thermiques et d'occurrence de périodes sèches augmentent dans la région. De tels changements dans les événements extrêmes ont et auront un impact sur les différentes activités humaines, principalement l'agriculture (Marengo et al., 2009). En effet pour certaines régions, ces changements durant les stades de croissance les plus sensibles de la plante sont et seront le facteur déterminant du rendement (Mearns et al. 1984; Easterling et Apps, 2005; Schneider et al., 2007).

Une large gamme d'études se rapporte à l'impact des températures extrêmes sur la croissance et le rendement du blé dur. Une température maximale supérieure à 34°C accélère la sénescence de la surface foliaire, et une température minimum comprise entre 17°C et 19°C induit la diminution de la photosynthèse (Asseng et al., 2004). Wang et al. (2008) expliquent que la longueur de la période de croissance levée-montaison est bien corrélée aux températures minimales des mois d'hivers. Dans cette étude il a été observé qu'un raccourcissement de 4,3 jours de cette phase accompagne chaque augmentation de 1°C de la température minimale. Tao et al. (2006) montrent que les dates de floraison et de maturation sont significativement corrélées aux températures maximales et minimales au printemps. Ils constatent une précocité des deux dates respectivement de 2,98 et 2,15 jours pour chaque augmentation de la température maximale de 1°C, et une précocité de 3,15 et 2,27 jours des deux dates pour chaque augmentation de 1°C de la température minimale.

Une augmentation des températures maximales pendant le stade de floraison est constatée dans la région méditerranéenne, la réduction de l'indice de récolte qui en découle peut aller jusqu'à -15 % (Moriondo et al., 2011).

Le rendement en grain du blé dur est positivement corrélé aux températures minimales durant la période tallage-montaison, mais corrélé négativement aux températures maximales durant la période de croissance allant de la montaison à la formation du grain (Wang et al., 2008). En effet, le rendement en grain du blé dur peut diminuer de 9.68 % pour chaque augmentation de la température maximale de 1°C pendant les mois de printemps (Tao et al., 2004).

L'augmentation de la fréquence d'occurrence de périodes sèches et pluvieuses est considérée comme l'une des plus graves conséquences du changement climatique (Richard et Heim, 2002). Les changements dans le régime pluviométrique peuvent avoir à la fois des effets positifs et négatifs sur la production agricole. En général, la production des plantes est négativement corrélée aux augmentations de précipitation en zone humide, mais positivement corrélée aux augmentations de précipitation en environnement semi-aride et aride (Xiao et al., 2008). Dans ces derniers, la sécheresse est l'un des phénomènes naturels les plus désastreux (Hellmuth et al., 2009), notamment pour les sociétés dépendant pour leur subsistance de la production agricole (FAO, 2004). Il existe plusieurs manières de définir une sécheresse, mais la plus générale est de considérer que la sécheresse est toute saison caractérisée par une faible pluviométrie par rapport aux besoins en eau des cultures, et dont le résultat est une pauvre récolte ou un échec total de la culture (Giunta et al., 1993; Bannayan et al., 2010; Araya et Stroosnijder, 2011). Il existe deux types de sécheresse : intercalaire et terminale. Dans le cas des sécheresses intercalaire, le stress peut survenir à n'importe quel moment avec des

intensités variables entre la levée et la maturité, alors que la sécheresse terminale survient lorsque la culture arrive à maturité dans des conditions d'épuisement progressif de l'humidité du sol (Ludlow et Muchow, 1990).

Les changements futurs dans les événements extrêmes pluviométriques devraient influencer significativement sur le rendement des cultures dans les régions caractérisées par une faible disponibilité en eau (Fahad, 2002). Dans le Royaume-Uni, l'impact de l'augmentation de la variance de la température et de la variabilité de la durée de périodes sèches et humides sur la distribution des rendements est inconnue (Xiao et al., 2008).

Le principal facteur limitant les rendements de blé dans le monde est la variabilité du climat, principalement la disponibilité en eau et les risques de sécheresse durant la saison de croissance (Latiri et al., 2010). La disponibilité en eau du sol est le principal facteur limitant de la production : 25 % du blé au Canada est cultivé en pluvial, et les diminutions de rendement dues aux sécheresses peuvent atteindre 2 à 4.5 t/ha (Janzen, 1987).

Dans les régions méditerranéennes du centre et de l'ouest de l'Europe, Lashkari et Bannayan (2012) rapportent que les sécheresses intercalaires sont observées dans la plupart des régions, où ces courtes périodes de sécheresse affectent occasionnellement les semis d'automne, mais moins régulièrement les semis de printemps et les cultures à longue saison de croissance. Les sécheresses terminales caractérisent plutôt les environnements à faible pluviométrie du climat méditerranéen. Dans ces derniers, la croissance des cultures est limitée à une courte saison de croissance qui commence avec les pluies d'automne et s'achève avec la décroissance de l'humidité du sol et l'augmentation des températures au printemps (Cooper et al., 1987; Debaeke et Aboudrare, 2004).

Les futurs climats méditerranéens secs et chauds devraient être bénéfiques pour la culture de l'olivier et de l'oranger, mais vont influencer négativement sur la croissance et le rendement du blé dur (Rozenzweig et Tubiello, 1997), notamment dans la partie sud de la région, où la disponibilité en eau d'irrigation a toujours été un facteur limitant de la culture du blé dur (Bindi et al., 1993; Delocolle et al., 1995; Iglesias et Menguez, 1995; Latiri et al., 2010). Ventrella et al. (2012), montrent que l'augmentation des températures et la diminution des précipitations induites par le changement climatique futur dans le sud de l'Italie, concernant principalement les mois d'Avril et Mai, auront un effet très pénalisant sur le rendement en grain du blé dur.

5. Interactions entre les principales composantes du changement climatique et importance du choix de l'itinéraire technique

Les différentes composantes du changement climatique détaillées ci-dessus n'agissent pas indépendamment, mais interagissent les unes avec les autres. Bien que les effets individuels de l'augmentation des températures, de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ et du changement dans la distribution des précipitations sont relativement bien connus, peu d'études ont été menées sur leurs interactions (Xiao et al., 2008). Cette information est cruciale avant le développement de toute stratégie d'adaptation. Par exemple, l'adaptation à l'augmentation des températures peut être différente de l'adaptation au changement du régime pluviométrique (Ludwig et Asseng, 2006). Il est bien connu que des conditions limitantes de disponibilité en eau tendent à améliorer la réponse des cultures à l'accroissement du taux de CO₂ dans l'air (Burkart et al., 2004). Les modèles de projections prévoient une diminution des rendements, suite à l'impact combiné de l'augmentation des températures et de la réduction de l'humidité des sols, diminution que l'augmentation du taux de CO₂ pourra compenser dans certaines régions (Ewert et al., 2002; Long et al., 2006). L'augmentation des températures de printemps et d'été pourraient être bénéfiques pour le rendement des cultures dans les latitudes nord tempérées, où la longueur de la saison de culture pourrait augmenter (Xiao et al., 2008). Cependant, l'élévation des températures serait probablement déterminante en environnement de type méditerranéen, où les hautes températures de printemps et d'été et les stress hydriques limitent déjà la production des cultures, notamment du blé (Rosenzweig et Tubiello, 1997).

Toutefois, ces résultats peuvent être influencés par la prise en considération de l'interaction avec les pratiques culturales, telles que la fertilisation, l'irrigation et le choix de la date de semis (Ventrella et al., 2012). Les rendements des cultures sont affectés par les pratiques agricoles et un grand nombre d'entrées telles que les fertilisants, pesticides et herbicides, dépendent du niveau de développement des pays (c'est-à-dire pays industrialisés contre ceux moins industrialisés) (IAASTD, 2009).

Cela est en accord avec l'étude menée par El Afandi et al. (2010) en Egypte sur le rendement du blé dur, où l'adoption d'une gestion correcte des irrigations peut être utilisée pour réduire l'impact négatif dû à la hausse des températures et à la réduction des précipitations. Delecolle et al. (1995) calculent que le rendement du blé dur en France ne devrait pas diminuer en régions tempérées et en zones méditerranéennes où l'irrigation n'est pas limitée. Iglesias et Minguez (1995) prévoient un impact négatif du changement climatique en zone aride d'Espagne, où l'irrigation est souvent insuffisante. Iglesias et Minguez (1996), Kapetanaki et

Rosenzweig (1997) et El-Shaeret al. (1996), utilisant des scénarios GCM dans des études d'adaptation et d'analyse de l'impact des principales composantes du changement climatique sur la culture du blé et du maïs en Espagne, trouvent que la sensibilité de ces deux cultures aux changements climatiques est liée aux problèmes actuels et futurs de gestion de l'eau. L'étude de Ventrella et al. (2012) menée sur les stratégies d'adaptation du blé dur face aux changements climatiques au sud de l'Italie montre que l'application de l'irrigation, de la fertilisation et la combinaison des deux ont un effet important non seulement sur l'augmentation de la biomasse et du rendement en grain, mais aussi sur la diminution de la variabilité interannuelle du rendement (entre -10 % et -40 %).

Les stratégies d'adaptation utilisées habituellement par les céréaliculteurs dans le bassin méditerranéen, et testées continuellement dans un environnement de changement climatique, sont la précocité du semis et l'utilisation de variétés précoces. L'adaptation de ces deux techniques change, cependant, en fonction de la région (Kapetanaki and Rosenzweig, 1997). Le semis précoce permet d'échapper aux périodes de stress hydrique et thermique survenant vers la fin du cycle de culture (Rosenzweig and Tubiello, 1997). Iglesias and Minguez (1996) calculent que le semis précoce pourrait réduire l'effet du changement climatique sur le maïs dans le nord de l'Espagne, mais pas dans la zone sud. L'étude menée par Lhomme et al. (2009) en Tunisie, montre que le semis précoce pourrait minimiser les effets négatifs du changement climatiques futur sur le rendement en grain du blé dur. L'utilisation de variétés précoces permet d'optimiser les besoins en eau d'irrigation durant la saison de culture (Rosenzweig et Tubiello, 1997). Elle permet un meilleur remplissage du grain dans les régions nord de la Grèce (Kapetanaki et Rosenzweig, 1997). Les travaux d'El-Shaer et al. (1996) montrent que l'adaptation de ces deux stratégies permettrait de faire face aux effets négatifs du changement climatique en Egypte.

6. Conclusion

Du fait de sa liaison étroite au climat, l'agriculture compte parmi les secteurs économiques les plus préoccupants dans le contexte du changement climatique futur, particulièrement dans les pays en voie de développement, où la production agricole constitue une grande partie du PIB (Produit Intérieur Brut). Les rendements en grain devraient décroître dans les pays en voie de développement et la situation d'insécurité présente devrait s'aggraver encore plus dans le futur. La compréhension de la réponse des cultures aux facteurs environnementaux et à leur variabilité est ainsi de la première importance dans le monde de la recherche. La modélisation des cultures constitue un outil clé d'apport d'information dans ce domaine. En combinaison avec les GCM et RCM, elle apporte des renseignements concernant l'évolution des cultures dans des conditions climatiques données, tant réelles que simulées. C'est un moyen de compréhension de la vulnérabilité et de l'adaptabilité des différentes fonctions du végétal au climat, et une solution irremplaçable pour la gestion des cultures dans le contexte du changement climatique futur.

Le changement du climat est caractérisé principalement par une augmentation des températures et un changement dans le régime pluviométrique. Les impacts de ces changements sur la productivité des cultures sont susceptibles d'être négatifs. Bien que des hausses modérées de température puissent provoquer des augmentations modérées de la productivité, au-delà de 1 °C de réchauffement, la littérature tend à s'accorder que les impacts seront négatifs. A l'inverse, le débat est important concernant l'effet fertilisant dû à l'augmentation du taux de CO₂ dans l'air, ainsi que sur ses capacités à pouvoir atténuer les effets négatifs sur les rendements projetés dans le futur. Ces impacts sont non seulement variables en fonction des régions mais aussi des cultures.

Dans la zone sud du bassin méditerranéen où l'irrigation a toujours constitué un facteur limitant pour les cultures, les études montrent que les changements climatiques vont se manifester par un raccourcissement du cycle de culture du blé dur induisant une diminution de l'accumulation de matière sèche totale et donc du rendement en grain. Ces effets négatifs peuvent cependant être atténués par une bonne sélection des itinéraires techniques tels que le choix de variétés précoces et la pratique de l'irrigation.

PARTIE II.

MATERIELS ET METHODES

Chapitre 3. Matériels et méthodes

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer l'ensemble des matériels et méthodes employés pour l'accomplissement de cette thèse à commencer par la description agro-climatique de nos deux sites d'étude (Alger et Bordj Bou Arreridj) et du modèle de simulation du climat jusqu'aux différentes méthodes utilisées pour le traitement des résultats, tout en passant par le détail du modèle de culture et de sa validation.

2. Zones d'études

2.1. Situation géographique

L'impact du changement climatique sur la culture de blé dur est étudié sur deux zones de l'Algérie correspondant à des étages bioclimatiques différents : Alger (lat. 36.77° N, long. 3.22°E, alt. 24m), région côtière du Nord, et Bordj Bou Arreridj (lat. 36.07° N, long. 4.77°E, alt. 930 m), dans les Hautes Plaines Est du pays (Figure 11). Les deux zones sont localisées à l'intérieur de l'aire de production des céréales (Fig. 12).

Alger se situe au niveau de la plaine de la Mitidja, vaste plaine uniforme qui s'étend sur une largeur de 15 Km depuis l'oued Nador à l'Ouest jusqu'à l'oued Boudouaou à l'Est, et bordée par deux zones élevées : le Sahel au Nord et l'Atlas au Sud. L'altitude de la région varie entre 14 m et 260 m (Ecrement, 1970).

La région de Bordj Bou Arreridj occupe une place stratégique dans l'Est Algérien. En effet elle se trouve à mi-parcours entre Alger et Constantine. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Bejaïa et Sétif, à l'Est par la wilaya de Sétif, à l'Ouest par la wilaya de Bouira et au Sud par la wilaya de M'sila. Elle est composée de trois zones géographiques qui se succèdent : une zone montagneuse au nord avec la chaîne des Bibans, une zone de hautes plaines qui constitue la majeure partie de la région, et une zone steppique, au sud-ouest, à vocation agropastorale. L'altitude varie entre 302 m et 1 885 m.

2.2. Description du climat et du sol

Le climat de la zone d'Alger et de type méditerranéen, c'est-à-dire à hiver doux et humide et été chaud et sec. La pluviométrie annuelle de la région d'Alger avoisine les 600 mm. Son climat est fortement influencé par la proximité de la mer, les risques de gelées sont moindres, les températures sont moins élevées et l'humidité relative de l'air plus élevée qu'à l'intérieur du pays (Chourghal, 2003). Les sols de la région sont profonds, fertiles, constitués d'alluvions mélangées à des colluvions, et présentent d'énormes potentiels pour le développement de l'agriculture (Seltzer, 1949). Le climat et le sol de la région sont favorables (voire très favorables) à une large gamme de cultures.

Bordj Bou Arreridj est caractérisée par un climat méditerranéen du type « D » (Baldy, 1992) », et se trouve sous la triple influence de « l'Atlas Tellien » qui limite les précipitations hivernales (350-450 mm), le Sahara et « l'Atlas Saharien », responsables de masses d'air sec.

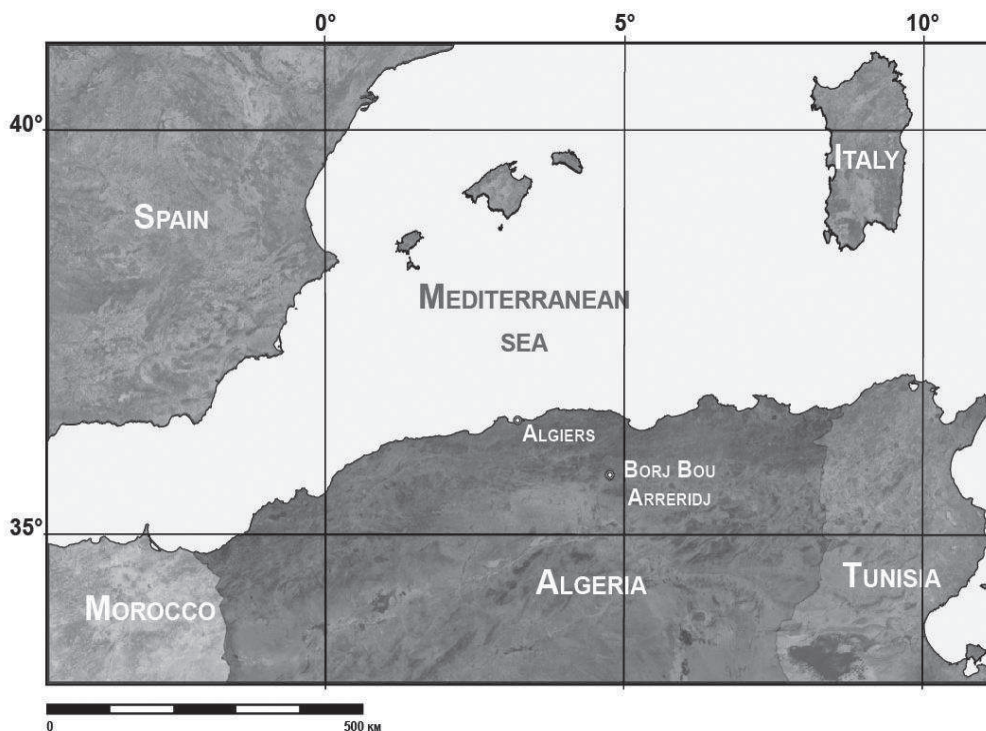


Fig . 11. Situation géographiques des deux zones d'étude.



Fig. 12. Aires de production des céréales en Algérie

Une demande importante en eau coïncide souvent avec la saison de semis et la phase de reproduction, particulièrement le remplissage du grain des céréales (Kolai, 2008). Le climat de la région est semi-tempéré avec une température moyenne du mois le plus froid comprise entre 0 et 10°C (Baldy, 1974). Dans cet environnement, les aléas climatiques et les sécheresses sont des données décisives pour les systèmes de production dominés par les céréales (Baldy, 1986). Les sols de la région sont caractérisés par une texture lourde à très lourde, une faible profondeur et une teneur modérée en matière organique (Bahlouli, 2006). Selon Zitouni (1991) et Mohamedou (2000), les sols bruns calcaires, développés sur des alluvions, colluvions ou sur des marnes, représentent la principale unité pédologique de la région.

2.3. Données climatiques historiques

Trente années de données climatiques journalières (précipitation, température moyenne, humidité relative, durée d'ensoleillement et vitesse du vent) ont été collectées à partir des stations météorologiques des deux régions d'étude.

La série climatique s'étend de 1978 à 2007 pour la zone d'Alger, et de 1980 à 2009 pour celle de Bordj Bou Arreridj. Le rayonnement solaire incident (R_s) est estimé à partir de la durée d'insolation (n) au moyen de la formule d'Angstrom comme suit :

$$\frac{R_s}{R_{s0}} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

R_{s0} est le rayonnement solaire extraterrestre, ou rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère, N la durée maximum possible d'ensoleillement, a et b sont des coefficients qui représentent la fraction du rayonnement solaire extraterrestre qui atteint la terre en jour clair. Les valeurs de a et b sont prise égales respectivement à 0.25 et 0.50, comme recommandé par FAO-56 (Allen et al., 1998) dans le cas de où les valeurs calibrées de ces deux coefficients ne sont pas disponibles .

L'évapotranspiration de référence ET_0 est calculée par la méthode définie dans FAO-56 (Allen et al., 1998). C'est l'évapotranspiration d'une culture de référence d'une hauteur supposée de 0.12 m, ayant une résistance de surface de 70 s m^{-1} et un albédo de 0.23, ce qui permet de l'assimiler à une culture de gazon, de hauteur uniforme, en phase active de croissance, couvrant complètement le sol et ne souffrant d'aucune restriction hydrique (Allen et al., 1998). La formule universelle de calcul de l' ET_0 de la FAO est basée sur le modèle combiné de Penman-Monteith (1948-1963) et s'écrit de la manière suivante :

$$ET_0 = \frac{0.48 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

avec :

ET_0 : Evapotranspiration de référence en mm j^{-1} ,

R_n : Rayonnement net de la culture ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$),

G : Densité de flux de chaleur dans le sol,

T : Température moyenne journalière à 2 m de hauteur ($^{\circ}\text{C}$),

U_2 : Vitesse du vent à 2 m de hauteur (m s^{-1}),

e_s : Pression de vapeur saturante à la température de l'air (kPa),

e_a : Pression de vapeur réelle (kPa),

$e_s - e_a$: Déficit de saturation en pression de vapeur (kPa),

Δ : Dérivée de la courbe de pression de vapeur saturante ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

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

Les étapes de calcul de la formule, détaillées dans le bulletin de la FAO N°56, ont été programmées sous Excel, pour aboutir à deux séries climatiques historiques d' ET_0 .

2.4. Rendements observés

L'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), qui dispose de stations expérimentales sur l'ensemble des aires de production des grandes cultures (Figure 13), a fourni des séries de rendements observés pour les deux zones d'étude. L'historique de rendements disponible dans les archives de l'ITGC est cependant court et ne couvre que quelques années des séries climatiques observées des deux régions. Nous avons pu collecter 15 années (1993-2007) à la station d'Oued Smar, pour représenter la région d'Alger, et 13 années (1997-2009) à la station de Sétif dont la zone d'action couvre la région de Bordj Bou Arreridj (Tableau 5). Les informations fournies donnent tous les détails concernant le déroulement des campagnes.

A Alger nous avons principalement les variétés Waha et Vitron, caractérisées par leur précocité et bonne productivité (jusqu'à 4.5 t ha^{-1}), mais aussi par leurs sensibilité à la sécheresse (Amokrane et al., 2002). Dans cette zone, le semis est recommandé du 1^{er} au 20 Novembre pour les variétés précoces et du 20 Octobre au 10 Novembre pour les variétés tardives (ITGC, 2001).

A Bordj Bou Arreridj, nous avons Waha et deux autres variétés locales, Mohamed Ben Bachir et Boussellam, caractérisées par un cycle végétatif moyennement tardif, une productivité moyenne et une bonne tolérance à la sécheresse (ITGC, 2006). Les périodes de semis conseillées dans cette région sont du 10 Novembre au 15 Décembre pour les variétés précoces et du 25 Octobre et 31 Novembre dans le cas de variétés tardives (ITGC, 2001).

3. Simulation du climat présent et scénarios climatiques futurs

3.1. Modèle climatique

Les données journalière simulées de précipitation, température moyenne, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement solaire sont obtenues par le modèle climatique ARPEGE-Climat, version 4 (Déqué, 2007) de Météo-France. Le modèle couplé ARPEGE-Climat a été choisi pour sa capacité à reproduire de manière acceptable les principales caractéristiques du climat méditerranéen (Déqué et al., 1994 ; Déqué, 2007).



Fig. 13. Répartition des stations expérimentales de l'ITGC (<http://www.itgc.entreprises-dz.com/pages/stations.htm>).

Tableau 5. Zones d'action des stations expérimentales de l'ITGC (<http://www.itgc.entreprises-dz.com/pages/stations.htm>)

Numéro de la station	Wilaya d'implantation	Wilayates constituant la zone d'action
1	Guelma	Skikda, Annaba, Tarf, Guelma, Souk-Ahras.
2	Constantine	Constantine, O.ElBouaghi, Khenchela, Tébessa, Mila.
3	Sétif	Béjaia, Jijel, Bordj Bou Arréridj , Sétif, M'Sila, Batna.
4	Médéa	Médéa, Bouira.
5	Alger	Tipaza, Alger , Boumerdès, Blida, Tizi-Ouzou.
6	Ain Defla	Chlef, Ain Defla.
7	Tiaret	Mostaganem, Relizane, Tissemsilt, Tiaret.
8	Saïda	Mascara, Saïda
9	Sidi Bel Abbes	Oran, Aïn-témouchent, Sidi Bel Abbès, Tlemcen

Source: <http://www.itgc.entreprises-dz.com/pages/stations.htm>.

Il a été en effet utilisé pour des études d'impact (Garcia de Cortazar, 2006; Terray et Braconnot, 2007; Lhomme et al., 2009) et il s'agit de l'un des modèles retenus par l'IPCC (2007).

Le modèle numérique ARPEGE est un modèle de circulation générale global développé en collaboration avec le Centre Européen de Prévision (CEP à Reading, U.K.) pour la prévision numérique du temps. La version nommée ARPEGE-Climat, a été développée dans les années 90 (Déqué et al., 1994). Le modèle ARPEGE-Climat est devenu au cours du temps la composante atmosphérique du modèle "système terre" du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) couplant les différentes composantes du système climatique (atmosphère, océan, végétation, glace de mer). La grille d'ARPEGE a la capacité d'être basculée pour changer la position du pôle et étirée pour augmenter la résolution dans une zone d'intérêt. Cette capacité de zoom a permis de développer des études régionales du climat avec ARPEGE-Climat (Déqué et Piedelièvre, 1995; Gibelin et Déqué, 2003). Typiquement la version 4 du modèle ARPEGE-Climat possède un pôle placé en mer Tyrrhénienne avec un facteur d'étirement de 2.5 et une résolution horizontale de l'ordre de 50 km dans la zone Europe-Méditerranée-Afrique du Nord.

Parmi les applications du modèle ARPEGE-Climat, peuvent être cités :

- les études de processus climatiques globaux (mousson indienne, mousson africaine, ENSO, NAO)
- les études de processus climatiques régionaux (cyclogenèse en Méditerranée, événements extrêmes en Europe, circulation thermo-haline en mer Méditerranée, cyclones tropicaux)
- les scénarios de changement climatique globaux ou régionaux
- la prévision saisonnière
- des expériences d'inter-comparaison
- le forçage (couplage) de modèles océaniques de la mer Méditerranée.

Le modèle génère une première série de 30 ans représentant le climat présent, couvrant la période 1978-2007 pour la région d'Alger et celle de 1980-2009 pour Bordj Bou Arreridj, et une deuxième série de données représentant le climat futur possible de 1971 à 2100 selon le scénario SRES A1B (IPCC, 2001). Ce dernier a été choisi du fait de sa caractérisation médiane de l'évolution de la concentration en CO₂ de l'atmosphère et de la croissance économique (Voir la section 1.5.2).

3.2. Correction des données simulées

La correction des variables simulées est réalisée par la méthode Quantile-Quantile. Le principe de la méthode repose sur la transformation des données « biaisées » simulées en de nouvelles données qui préservent la même distribution de fréquence observée (Déqué, 2007).

Dans un premier temps, une fonction de correction est générée en confrontant quantile par quantile le scénario simulé pour la période de référence avec les données observées. Comme indiqué dans le Tableau 6, les quantiles sont utilisés pour dresser une table de correction à partir des deux fonctions de distribution cumulatives de la période de référence: l'une correspond aux données observées F_0 (colonne 1) et l'autre à celles simulées F_s (colonne 2). Pour une valeur donnée x_f du scénario futur, nous cherchons dans la colonne 2 la fréquence cumulative correspondante de la donnée simulée de la période de référence :

$$F_s(x_f) = F_s(x_s < x_f) \quad (4)$$

La valeur de la même fonction de distribution cumulative fdc est ensuite cherchée sur la colonne 1 (données observées) et cette valeur $x_{f,c}$ est utilisée comme valeur corrigée de x_f . Des interpolations linéaires sont appliquées entre les deux quantiles. Ce qui donne :

$$F_0(x_{f,c}) = F_s(x_f) \quad (5)$$

Une difficulté se pose pour les variables limitées par zéro comme la précipitation. Comme le modèle tend à brainer (surestimer les faibles précipitations et sous-estimer les fortes pluies), la probabilité de précipitation dans les données modélisées (scénario de référence et futur) est supérieure à celle calculée avec les données observées. Par conséquent, les faibles précipitations dans les scénarios futurs sont d'abord corrigées en les tronquant avec un certain seuil $x_{f,0}$ de sorte que la probabilité de pleuvoir (ou de non pleuvoir) après correction est égale à celle observée. Ainsi, dans le scénario futur, toute valeur inférieure à $x_{f,0}$ (déterminée de cette façon) est mise égale à zéro et la table de correction fdc est construite avec les valeurs strictement positives de la variable.

Tableau 6. Table de distribution des quantiles des deux périodes de référence (observée et simulée).

F(x)	(1) x_0	(2) x_s
0.1	$x_{0,1}$	$x_{s, 1}$
0.2		
0.3		
0.4		
0.5		
0.6	$x_{f,c}$	x_f
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		

$$F_f(x_f < x_{f,0}) = F_o(x_o = 0) \quad (6)$$

Et si une valeur donnée du scénario futur est supérieure à la plus grande valeur trouvée dans le scénario de contrôle (colonne 2), une correction constante est appliquée par extrapolation de la correction du plus grand quantile (correspondant à $F(x) = 1$).

3.3. Comparaison entre climats

La comparaison des valeurs annuelles et mensuelles des différents paramètres climatiques, entre les séries simulées pour la période de référence (désignées s) et les séries observées (désignées obs), est faite en utilisant le test de Student-Fisher avec une probabilité $P < 0.05$.

Le changement dans le climat est estimé par la méthode des anomalies. Le calcul est fait entre les valeurs mensuelles interannuelles simulées du scénario futur (désignées f) et celles du scénario de référence. Dans le cas de la température, l'anomalie est définie comme étant la différence en °C dans la moyenne mensuelle interannuelle des températures entre le scénario futur et celui représentant la période de référence :

$$\delta T \delta(^{\circ}C) = T_f(^{\circ}C) - T_s(^{\circ}C) \quad (7)$$

L'anomalie dans le cas des autres paramètres climatiques (précipitation, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse du vent et évapotranspiration) est définie comme le rapport exprimé en pourcentage de la différence des moyennes mensuelles interannuelles du paramètre considéré relatives aux deux scénarios simulés (futur et de référence) sur celle du scénario de référence. Dans le cas des précipitations par exemple, elle s'exprime comme suit :

$$\rho P (\%) = \frac{P_f - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (8)$$

Une anomalie peut être positive pour indiquer une élévation du paramètre dans le futur et négative pour indiquer l'inverse.

4. Simulation de la culture du blé dur

Le modèle utilisé dans notre étude est un simple modèle générique axé sur les processus, ayant la capacité de calculer le développement, le bilan hydrique et le rendement de la culture du blé dur. Conçu dans une perspective agro-météorologique à l'échelle régionale, il est la combinaison et l'adaptation de modèles déjà appliqués à différentes cultures annuelles (Lhomme et Katerji, 1991; Lhomme et al., 2009; Sanabria et Lhomme, 2013; Sanabria et al., 2014). Le modèle fonctionne au pas de temps journalier suivant une succession d'étapes ; il utilise quatre entrées climatiques (précipitation, température moyenne, rayonnement solaire et évapotranspiration de référence) et certains paramètres concernant la culture (Tableau 10). Il se compose de six « subroutines »:

- Détermination de la date de semis,
- Détermination de la durée théorique des différentes phases phénologiques,
- Calcul de l'évolution du LAI et du rendement potentiel,
- Calcul du bilan hydrique sur le cycle cultural,
- Interruption du cycle par un stress hydrique pendant la période de floraison,
- Calcul du rendement réel.

4.1. Détermination de la date de semis

Deux options de semis sont présentées par le modèle :

- Semis dynamique : la date de semis n'est pas prescrite, la culture est semée si pendant cinq jours consécutifs ($N_s = 5$) une précipitation cumulée minimale P_s de 20 mm survient. Si ce critère n'est pas rempli, il y a échec du semis. Dans la situation présente, la date de semis est limitée à la période traditionnelle de semis du blé en Algérie. Dans le climat présent (indice a), elle est définie entre $JA1 = 305$ (1^{er} Novembre) et $JA2 = 365$ (31 Décembre), JA désignant le jour de l'année. Pour le scénario futur (indice f), cette période de semis est étendue du 1^{er} Octobre au 31 Janvier, afin de prendre en compte les effets possibles du changement climatique (le critère de semis utilisé peut survenir avant ou après les limites traditionnelles).
- Semis prescrit : La date de semis JA est fixée au 1^{er} Novembre avec une irrigation d'appoint (P_s) le jour même (Teixeira et al., 1995).

Le choix du type de semis se fait par simple introduction de la valeur d'un premier indicateur de choix IND1 (1 pour le choix d'une date de semis dynamique et 2 pour le choix d'une date de semis prescrite).

4.2. Détermination de la durée théorique des phases phénologiques

Les longueurs des phases de développement de la culture sont exprimées en temps thermiques appelés aussi sommes de température (ST) avec une température de base de 0°C (Soltner, 1987). Quatre phases phénologiques sont prises en considération : la phase initiale $L1$ (semis-germination), la phase de développement végétatif $L2$ (tallage), la phase de mi-saison $L3$ (montaison) et la phase de fin de saison de croissance $L4$ (floraison-remplissage des grains). Chacune d'elles requiert une somme de température (ST_k) nécessaire à sa réalisation. L'obtention de la somme de température nécessaire à la réalisation d'une phase donnée définit automatiquement sa longueur et donc la date de sa fin. La date de semis étant désignée par $D1$, quatre autres dates ($D2, D3, D4, D5$) sont ainsi définies : $D2 = D1 + L1$, $D3 = D2 + L2$, $D4 = D3 + L3$, $D5 = D4 + L4$.

4.3. Calcul du rendement potentiel (maximum) et de l'évolution du LAI

Le rendement potentiel (Y_m) est calculé en utilisant la relation de Monteith (Monteith, 1977), qui relie l'accumulation de biomasse totale TDM_m (total dry mater) au rayonnement solaire incident R_s multiplié par l'efficacité climatique ε_c (supposée égale à 0.48), l'efficacité d'absorption ε_a et l'efficacité biologique de conversion ε_b , appelée aussi efficacité

d'utilisation du rayonnement *RUE* (voir **Chap. 2, section 3.3.2**). Au cours du cycle de la culture, la quantité maximale de matière sèche accumulée s'écrit :

$$TDM_m = \varepsilon_c \varepsilon_b \sum \varepsilon_a(j) R_s(j) \quad (9)$$

L'efficacité d'absorption est une fonction du *LAI* le jour *j* (Monteith, 1977; Jamieson et al., 1998) :

$$\varepsilon_a(j) = 1 - \exp[-0.5 LAI(j)] \quad (10)$$

Le *LAI* est supposé varier avec le stade de développement de la même façon que les coefficients culturaux. Il commence à partir de 0 à la phase initiale (*L₁*), augmente linéairement durant la phase *L2* pour atteindre une valeur maximale *LAI_x*, reste constant durant la phase mi-saison de croissance (*L₃*) et diminue après linéairement jusqu'à 0 durant la phase de fin de saison (*L₄*). Cette formulation du *LAI* rend la quantité de matière sèche relativement insensible à la valeur prescrite de *LAI_x*, comme l'a expliqué Jamieson et al. (1998). L'effet des augmentations de *LAI* sur le rayonnement intercepté est faible lorsque *LAI* > 3 (Asseng et al., 2004). *LAI_x* est pris égal à 5, valeur typique dans des conditions méditerranéennes (Khaledian et al., 2009).

Comme la concentration atmosphérique en *CO₂* est supposée augmenter dans le climat futur engendrant un effet positif sur la photosynthèse, l'efficacité biologique de conversion (*ε_b*) est calculée en fonction de la concentration en *CO₂* de l'air (*C*) en suivant Gifford et Morison (1993), Jamieson et al. (2000), Manderscheid et al. (2003) et Richter and Semenov (2005): l'effet positif est linéaire de 370 ppm à 700 ppm, au-dessus de ce seuil aucun effet supplémentaire due à la concentration en *CO₂* ne survient. Le taux de croissance dans cet intervalle est de 0.086 % par ppm. La *RUE* dans les conditions présentes (*C* = 370 ppm) désignée par *ε_{b0}* est prise égale à 1g MJ⁻¹ (Mailhol et al., 2004) et *ε_b* prend alors la forme suivante :

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{b0} [1 + 0.00086 \min(C - 370, 330)] \quad (11)$$

Le rendement maximum est obtenu en multipliant la production de matière sèche totale (*TDM_m*) par l'indice de récolte *HI* (harvest index) :

$$Y_m = HI \cdot TDM_m \quad (12)$$

HI est pris égal à 0.27, valeur déterminée pour des variétés algériennes (Ali Dib et al., 1992).

4.4. Calcul du bilan hydrique sur le cycle cultural

Le bilan hydrique est calculé par le modèle développé et validé par Lhomme et Katerji (1991). C'est une approche à un seul réservoir sol, basée sur les mêmes principes que le modèle CROPWAT développé par la FAO (Allen et al., 1998). Dans ce modèle, la capacité du réservoir sol RU (réserve disponible totale ou réserve utile), définie comme la différence entre la quantité d'eau dans la zone racinaire à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent, est considérée varier entre une valeur minimale RU_n lorsque la culture est semée et une valeur maximale RU_x lorsque l'enracinement est à son développement maximum. Cependant, dans notre modélisation, nous supposons que la RU reste constante durant tout le cycle de la culture et égale à sa valeur maximale RU_x . Cela, afin de tenir compte des possibilités de changement du régime pluviométrique futur et d'arrivée de quantité significative de pluies précoces, capables de remplir le réservoir sol en début de saison de culture. Nous avons utilisé les valeurs de 180 mm et de 80 mm, déterminées expérimentalement par les stations ITGC respectivement pour la zone d'Alger et de Bordj Bou Arreridj.

Le bilan hydrique au jour j de la zone racinaire est calculé suivant un processus récurrent :

$$RD(j) = RD(j-1) + P(j) + I(j) - ET(j) - D(j) \quad (13)$$

$RD(j)$ est les réserve disponible à la fin du jour j , $RD(j-1)$ est la réserve disponible à la fin du jour antérieur, $P(j)$ est la précipitation du jour j , $I(j)$ est l'irrigation net, $ET(j)$ est l'évapotranspiration et $D(j)$ la percolation profonde.

Le ruissellement de surface et la remontée capillaire à partir de la nappe phréatique sont volontairement négligés dans le modèle. Ils sont très dépendants des caractéristiques spécifiques du terrain de culture. Par conséquent, ils sont très variables et difficiles à estimer à une échelle régionale.

Pour initialiser le calcul du bilan hydrique, une valeur initiale arbitraire est fixée. La percolation profonde est exprimée comme étant la différence entre les entrées totales en eau ($P + I$) et la capacité de rétention en eau du réservoir ($RU - RD$).

$$D = (P + I) - (RU - RD) \text{ si } (P + I) > (RU - RD) \quad (14)$$

$$D = 0 \quad \text{si } (P + I) \leq (RU - RD) \quad (15)$$

La modélisation de l'évapotranspiration de la culture prend en considération deux cas : d'abord, l'évapotranspiration dans des conditions standard d'alimentation en eau (ET_c) ; ensuite, dans des conditions de disponibilité limitée en eau. Dans des conditions standard, le calcul se fait par la multiplication de l' ET_0 par le coefficient cultural K_c , qui varie principalement avec les caractéristiques de la culture :

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (16)$$

La variation du K_c est décrite à partir de trois valeurs correspondant à trois phases phénologiques différentes : phase initiale ($K_{c1} = 1.00$), phase de mi-saison ($K_{c2} = 1.15$) et phase de fin de saison avec une valeur finale $K_{c3} = 0.25$. Entre ces stades, les valeurs du K_c sont linéairement interpolées utilisant les longueurs des phases phénologiques. Dans des conditions limitées en eau, l'évapotranspiration réelle ET de la culture s'écrit :

$$ET = K_{ws} \cdot K_c \cdot ET_0 \quad (17)$$

où K_{ws} est un coefficient décrivant l'effet du stress hydrique sur la transpiration de la culture. La méthode de la FAO (Allen et al. 1998), basée sur la fraction facilement utilisable RFU de la réserve utile, est utilisée pour déterminer K_{ws} :

$$RFU = x_p \cdot RU \quad (18)$$

x_p étant la fraction de la réserve utile utilisable sans difficulté (sans réduction de la transpiration) par la plante, prise égale à 2/3 dans notre approche. K_{ws} est égale à 1 si la différence entre RD et $(RU - RFU)$ est positive. Si la différence est négative, l'évapotranspiration est supposée diminuer en proportion de la réserve en eau du sol restante. K_{ws} est calculé comme suit :

$$K_{ws} = \frac{RD}{RU - RFU} \quad (19)$$

La résolution du bilan hydrique permet de calculer le déficit hydrique de la culture (DHC) sur une période donnée, défini comme étant la somme des déficits hydriques journaliers :

$$DHC = \sum_j DH(j) = \sum_j [ET_c(j) - ET(j)] \quad (20)$$

Un indice normalisé du stress hydrique (*ISH*) variant entre une valeur 0 (pas de stress) et 1 (stress total) est ainsi défini :

$$ISH = \frac{\sum_j [ET_c(j) - ET(j)]}{\sum_j ET_c(j)} \quad (21)$$

4.5. Interruption du cycle par un stress hydrique pendant la période de floraison

En Algérie il est bien connu que dans les aires potentielles de production de céréales des situations de sécheresse peuvent survenir à tout moment durant le cycle de développement de la céréale (Bensalem, 1993, Bouzerzour et Dekhili, 1995). Si les périodes de sécheresse sont longues et surviennent durant les stades critiques, la culture peut échouer (Blum, 1996). Par une analyse des facteurs agro-écologiques dans la région des hautes plaines de l'Est algérien, Kolai (2008) constate une concentration de la pluviométrie durant les mois de Décembre et Janvier et une nette décroissance pendant le reste du cycle en considération des besoins de la céréale. Il trouve que cette situation impose souvent des périodes de déficit hydrique temporaires ou permanentes, à l'origine de pertes considérables dans la production des céréales d'hiver.

Le modèle tient compte de cette importante caractéristique de l'agriculture pluviale par une formulation simple et pragmatique (Lhomme et al., 2009). Si une sécheresse de N_{ds} (= 7) jours consécutifs sans aucune disponibilité en eau, survient avant une date donnée, déterminée

comme étant un nombre de jours N_f (= 15jours) après la floraison, il y a échec total de la culture sans la réalisation du moindre rendement. Si cette sécheresse caractéristique arrive après cette date, le cycle est arrêté, mais néanmoins il y a réalisation d'un certain rendement modulé par le stress hydrique correspondant. L'accès à cette subroutine se fait par simple choix de la valeur d'un deuxième indicateur (IND2) (1, pour le choix d'un cycle cultural sans possibilité d'interruption par un stress hydrique et 2 pour le cas inverse).

4.6. Calcul du rendement réel Y_a

Les fonctions linéaires production végétale-eau, développées par Doorenbos et Kassam (1979) sont utilisées pour évaluer l'effet du déficit hydrique des cultures sur le rendement. Le rendement relatif, c'est-à-dire le rapport entre le rendement réel de la culture (Y_a) et son rendement maximum Y_m est déterminé comme suit :

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (K_y \cdot ISH) \quad (22)$$

K_y est le facteur de réponse du rendement, déterminé pour un certain nombre de cultures par Doorenbos et Kassam (1979) et publié dans le bulletin FAO N° 33. Cette approche générale a été développée et appliquée à tout type de culture et validée dans différentes études expérimentales (Raes et al., 2006). Dans le cas du blé d'hiver, la valeur de 1.05 pour le K_y est indiquée.

5. Programmation, organisation et sorties du modèle

Le modèle est programmé en Fortran 77. L'ordre chronologique de réalisation de l'ensemble des subroutines le composant est illustré dans la figure 14. Les paramètres d'entrée du modèle sont regroupés dans le tableau 7.

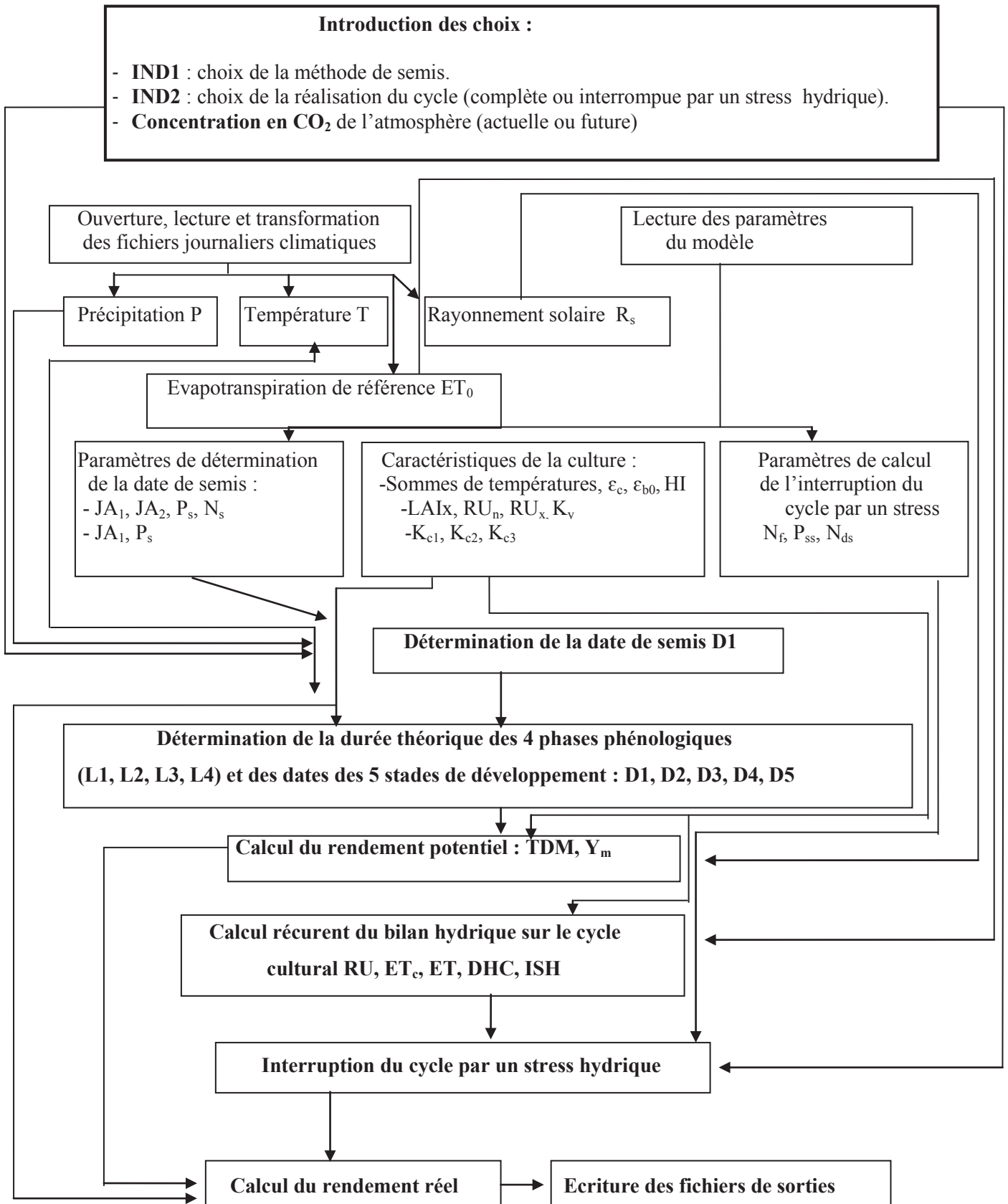


Fig. 14 Organigramme du modèle de simulation de la culture de blé dur.

Tableau 7. Paramètres du modèle de simulation de la culture de blé dur

	Paramètre	Symbole	Valeur
Semis	Date initiale de la période de semis	JA1	305 (P) 274 (F)
	Date finale de la période de semis	JA2	365 (A) 31 (F)
	Quantité de précipitation exigée	P_s	20 mm
	Nombre de jours consécutifs	N_s	5 jours
Phénologie	Somme de température (phase initiale)	ST1	400 °C jours
	Somme de température (phase de développement)	ST2	300 °C jours
	Somme de température (phase de mi-saison)	ST3	750 °C jours
	Somme de température (phase d'arrière saison)	ST4	1000 °C jours
Bilan Hydrique	Réserve Utile	RU	180 mm (A) 80 mm (B)
	Coefficient cultural (phase initiale)	K_{c1}	1.00
	Coefficient cultural (phase de mi-saison)	K_{c2}	1.15
	Coefficient cultural (fin de la phase d'arrière saison)	K_{c3}	0.25
Rendement	Indice de surface foliaire maximale	LAI_x	5
	Efficiencé climatique	ϵ_c	0.48
	Efficiencé biologique de conversion	ϵ_{b0}	1 gMJ ⁻¹
	Indice de récolte	HI	0.27
	Facteur de réponse du rendement	K_y	1.05
Interruption du cycle de Culture	Date limite exprimée en nombre de jours après floraison	N_f	15 jours
	Nombre de jours consécutifs sans réserve disponible	N_{ds}	7 jours

A: désigne Alger, B: Bordj Bou Arreridj, P: climat présent, F: climat futur, JA : jour de l'année.

Les sorties du modèles sont multiples et varient en fonction de l'objectif de l'étude réalisée. Dans notre cas les principales sorties sont : la date de semis, les dates de réalisation des différentes phases phénologiques, la production de matière sèche totale, le rendement maximum, l'indice de stress hydrique moyen et le rendement réel.

6. Validation du modèle

Le modèle de simulation utilisé dans notre étude a été employé dans plusieurs applications scientifiques pour simuler différentes cultures annuelles dans différentes régions. Cependant, ses performances en matière de simulation n'ont pas fait l'objet d'étude jusqu'à maintenant. Vu l'importance de cette étape, nous nous proposons de le valider ici en utilisant les séries de rendement observées dans les deux régions d'étude. Des régressions entre rendements observés et rendements simulés ont été réalisées, et les performances du modèle testées en utilisant trois paramètres, à savoir le coefficient de détermination et les paramètres de la droite de régression, le biais moyen et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

6.1. Le coefficient de détermination et les paramètres de la droite de régression

Une régression est l'expression de la relation existant entre une variable observée (Y_o) et simulée (Y_s). Cette relation peut être linéaire ou non. Dans le cas du modèle linéaire l'équation de régression s'écrit :

$$Y_s = a + b Y_o \quad (23)$$

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le **coefficient de détermination (R^2)** indique à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points.

Cela se traduit de manière graphique de la façon suivante: plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, $R^2=1$.

6.2. Le biais moyen

Le biais moyen B_m est la moyenne des écarts entre valeurs simulées et valeurs observées pour une série de n valeurs de la même variable :

$$B_m = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_n (Y_s - Y_0) \quad (24)$$

La précision du modèle d'estimation est d'autant meilleure que le biais moyen est faible. Un biais positif indique une tendance à la surestimation du modèle, à l'inverse un biais négatif indique que les valeurs estimées sont sous-estimées par rapport à celles observées réellement.

6.3. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne : désignée par le symbole

RMSE (Root Mean Square Error), c'est la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre prévisions et observations.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_n (Y_s - Y_0)^2} \quad (25)$$

7. Estimation de l'impact du changement climatique sur le développement et le rendement de la culture du blé dur

Pour les deux cas de semis proposés par le modèle, l'impact du changement climatique sur la culture du blé dur est étudié en comparant les sorties du modèle utilisant les données climatiques observées à celles obtenues en entrant les données climatiques futures. Le modèle offre une grande diversité de choix concernant les sorties. Par conséquent, pour estimer l'impact du changement du climat sur la culture, nous nous sommes intéressés particulièrement aux sorties suivantes :

- a- **L'échec du semis** : il concerne le cas de non prescription de la date de semis, il est calculé par comptage du nombre d'année où il n'y a pas eu de semis (critère de semis non atteint) exprimé en % du nombre total d'années.
- b- **Caractéristiques de l'échec du cycle de culture suite à l'occurrence de stress hydrique tel que décrit par le modèle**, ainsi que les caractéristiques statistiques de l'indice de stress hydrique et des rendements résultants :
 - L'échec de la culture correspond au nombre d'années (exprimé en %) où il n'y a eu aucun rendement.

- L'interruption du cycle par un stress hydrique et le raccourcissement correspondant du cycle. Ce dernier est calculé par comptage du nombre d'années (exprimé en %) où il y a eu interruption du cycle par un stress hydrique avec réalisation partielle de rendement.
 - Caractéristiques statistiques de la pluie cumulée et de l'indice de stress hydrique.
 - Caractéristiques statistiques du rendement maximum, de la matière sèche totale, du rendement réel et de la variation relative du rendement.
- c- *Caractéristiques statistiques du cycle cultural normal*** (sans interruption par un stress hydrique) :
- Date de réalisation des stades phénologiques de la culture (D1, D2, D3, D4 et D5), leur longueur et la longueur totale du cycle phénologique.
 - Caractéristiques statistiques de la pluie cumulée et de l'indice de stress hydrique.
 - Caractéristiques statistiques du rendement maximum, de la matière sèche totale, du rendement réel et de la variation relative de rendement.

8. Conclusion

La localisation de nos deux sites d'étude sur la carte de l'Algérie permet de fournir des résultats représentatifs des parties Centre et Est du pays.

Le modèle ARPEGE-CLIMATE de par ses objectifs, son maillage plus fin sur la zone Europe-Méditerranée-Afrique du Nord et sa bonne résolution spatiale, semble être un outil de simulation bien adapté pour initier la recherche sur le changement climatique en Algérie. Il peut en fait contribuer à avoir une idée globale des effets futurs des changements climatiques sur les cultures. La robustesse et la bonne précision de la méthode de correction des variables Quantile-Quantile justifie son emploi dans le travail présent.

Le modèle agrométéorologique choisi est simple d'utilisation, il simule le développement de la culture, calcule le bilan hydrique de l'eau et enfin estime le rendement. Les options concernant le choix de la date de semis représentent une combinaison des règles de gestion des semis utilisées traditionnellement par les céréaliculteurs dans la région. Le modèle prend en considération les possibilités d'occurrence d'une pluie conséquente pouvant remplir la réserve disponible, tôt dans la saison de croissance, ainsi que celles relatives à l'occurrence de sécheresses de fin de saison, premier responsable de la faiblesse des rendements céréalier en Algérie. Une version partielle du modèle a été utilisée sur blé dur en Tunisie (Lhomme et al., 2009). Les caractéristiques agro-climatiques des régions de cette étude sont voisines du contexte algérien. Elle nous sert de repère et d'outil de comparaison en l'absence de toute autre étude sur la même thématique en Algérie.

PARTIE III.

RESULTATS

Chapitre 4. Evaluation des performances du modèle de culture et validation

1. Introduction

Ce chapitre est consacré au test des performances du modèle de culture et à sa validation, étape n'ayant pas été réalisée jusqu'ici. Nous débutons par l'analyse des séries de rendements observés dans nos deux zones d'étude, et leurs comparaisons avec celles simulées par le modèle de culture. Ensuite nous exposons les résultats de l'application des différents tests et méthodes statistiques employés dans la validation du modèle de culture et expliqués en détail antérieurement.

2. Rendements observés

La série de rendements de blé dur observés dans la région d'Alger est composée de 15 années s'étalant de 1993 à 2007. Le rendement moyen interannuel est de 1.9 t ha^{-1} , l'écart type est de 0.49 t ha^{-1} . Le rendement maximum observé est de 2.5 t ha^{-1} , et le rendement minimum est de 1.1 t ha^{-1} . La productivité moyenne des variétés utilisées dans la région (jusqu'à 4.5 t ha^{-1}) est loin d'être atteinte malgré la bonne pluviométrie et la fertilité des sols de la Mitidja. Les bilans annuels mis à notre disposition par l'ITGC, indiquent en effet que la faiblesse des rendements est souvent due à la prolifération des maladies cryptogamiques favorisées par le taux d'humidité assez important dans la région.

A Bordj Bou Arreridj, la série observée de rendements a une taille de 13 années et couvre la période 1997-2009. Le rendement moyen interannuel est de 1.4 t ha^{-1} , l'écart type est de 0.63 t ha^{-1} . La série est caractérisée par un rendement maximum de 2.2 t ha^{-1} , et minimum de 0.4 t ha^{-1} . Malgré le classement de la région parmi les zones potentielles de production céréalière, les rendements moyens réels de la culture de blé dur restent faibles. Cela a pour origine l'irrégularité de la distribution de la pluviométrie dans le temps, qui induit souvent des périodes de sécheresses pendant des phases très sensibles de la culture (Smadhi et Zella, 2009 ; 2012).

3. Rendements simulés

A Alger et pour la même période observée, le modèle simule des rendements avec une moyenne de 1.9 t ha⁻¹ et un écart type de 0.25 t ha⁻¹. Le maximum de la série simulée est de 2.3 t ha⁻¹, le minimum est de 1.5 t ha⁻¹. Les rendements simulés dans la région de Bordj Bou Arreridj sont caractérisés par une moyenne de 1.4 t ha⁻¹ et un écart type de 0.50 t ha⁻¹. Le rendement maximum simulé est de 2.2 t ha⁻¹ et celui correspondant au minimum est de 0.62 t ha⁻¹.

Dans les deux zones d'étude, les rendements simulés évoluent de la même manière que ceux observés. Certaines différences peuvent être remarquées entre les représentations graphiques des deux séries. Cependant les moyennes interannuelles calculées à partir des deux séries observées et simulées ne sont pas significativement différentes selon le test de Student-Fisher à P < 0.05 (Tableau 8, Fig. 15).

4. Performances du modèle et validation

4.1. Paramètres de la droite de régression et coefficient de détermination

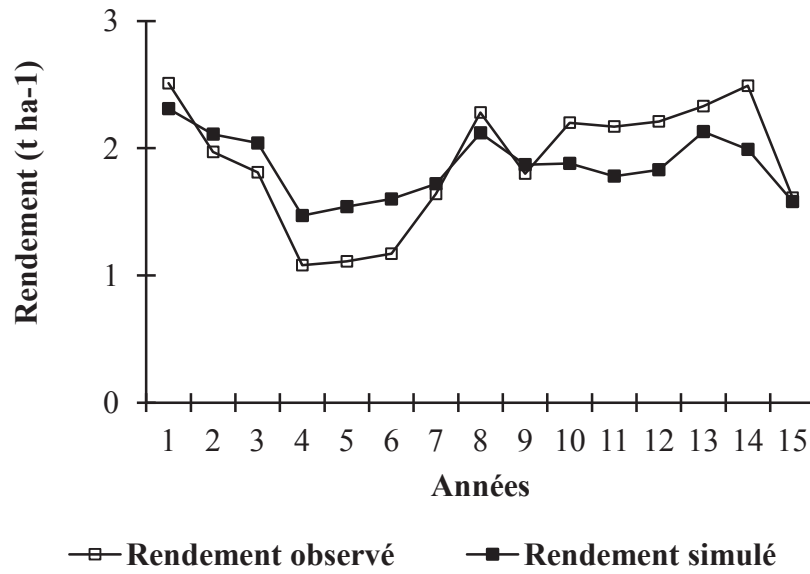
Etant la sortie finale du modèle, les rendements réels simulés ont été confrontés aux rendements réellement observés afin de tester les performances du modèle.

Il existe en effet un très bon ajustement entre rendements observés et simulés : les pentes des deux droites de régression passant par l'origine ($Y_s = a Y_o$) sont de 0.95 pour Alger et 0.99 pour Bordj Bou Arreridj et ne sont en fait pas significativement différentes de l'unité.

Tableau 8. Résultats du test de comparaison de Student-Fisher, entre rendements observés et simulés pour la région d'Alger.

	Rendement moyen interannuel observé (t ha ⁻¹)	Rendement moyen interannuel simulé (t ha ⁻¹)	T Student-Fisher	T théorique de Student-Fisher
Alger	1.9 ± 0.49	1.9 ± 0.29	0.7382259	2.021
Bordj Bou Arreridj	1.4 ± 0.63	1.4 ± 0.50	0.4345126	2.064

Alger



Bordj Bou Arreridj

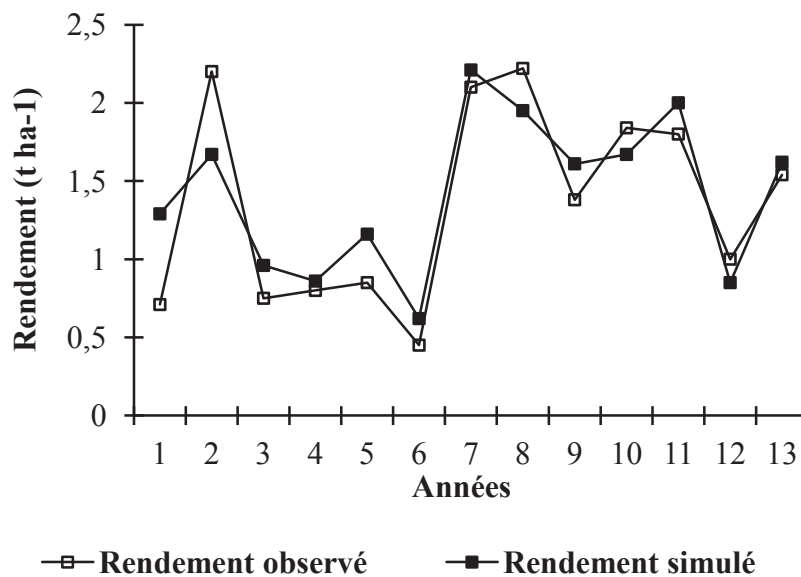
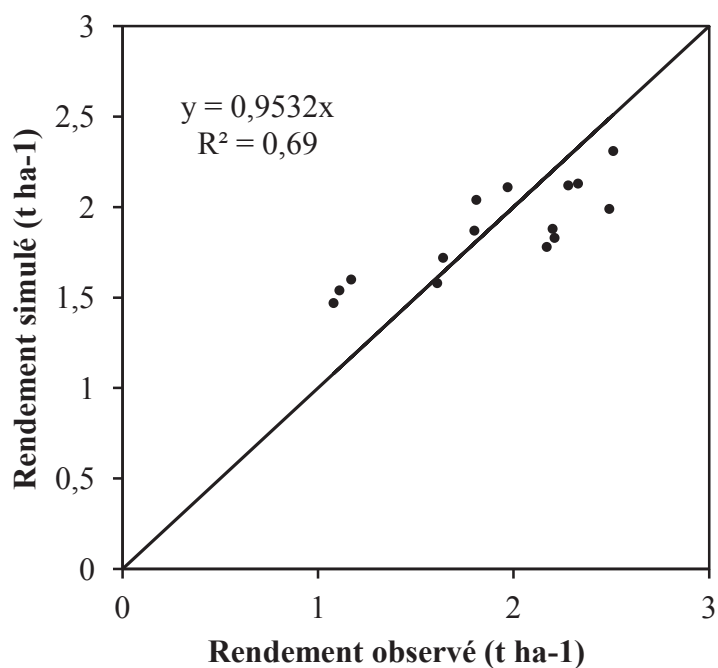


Fig. 15. Comparaison des rendements observés et simulés à Alger et Bordj Bou Arreridj.

Le nuage de point est, cependant, mieux rassemblé autour de la ligne 1 :1 dans le cas de Bordj Bou Arreridj par rapport à celui d'Alger. Cela est bien confirmé par le coefficient de détermination R^2 qui est de 0.80 dans le cas de Bordj Bou Arreridj contre 0.69 dans le cas d'Alger. La comparaison entre rendements observés et simulés pour les deux zones d'étude est montrée dans la figure 16.

Alger



Bordj Bou Arreridj

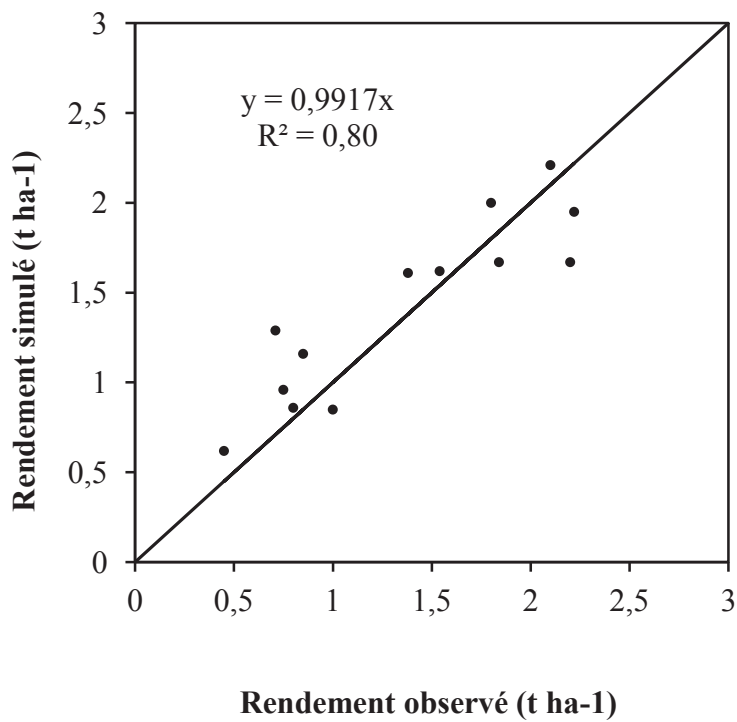


Fig. 16. Rendements simulés contre rendements observés pour les deux régions d'étude.

4.2. RMSE et biais moyen

La valeur de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) est faible pour les deux sites d'étude, elle est de 0.3 t ha^{-1} .

Dans le cas d'Alger, le biais B prend la valeur négative de -0.03 t ha^{-1} , indiquant une légère tendance à la sous-estimation des rendements par le modèle. Pour Bordj Bou Arreridj, le biais prend la valeur positive de 0.06 t ha^{-1} , dans ce cas le modèle tend plutôt à surestimer légèrement les rendements réels.

La meilleure performance du modèle pour la région de Bordj Bou Arreridj est probablement due à la valeur utilisée de l'indice de récolte ($HI = 0.27$). Cette dernière a été déterminée sur quelques variétés locales de blé dur, plutôt cultivées dans la région des hautes plaines de l'est Algérien et caractérisées par une productivité modérée. Cette valeur ne peut pas refléter le bon potentiel productif des variétés introduites dans la région d'Alger (Waha and Vitron), pour lesquelles la bibliographie ne fournit malheureusement pas de valeurs concernant le HI.

5. Conclusion

En comparaison avec les potentialités des deux zones d'étude, les rendements observés de blé dur sont très faibles et reflète en effet le niveau productif national. A Bordj Bou Arreridj, la différence remarquable entre rendement maximum et minimum souligne la variabilité importante de la productivité dans la région.

La différence entre rendements simulés et observés est non significative et le modèle manifeste plutôt une bonne performance en matière de simulation des rendements. La validation du modèle, à travers les valeurs du R^2 , Biais, RMSE, s'avère cependant être meilleure dans le cas de Bordj Bou Arreridj. Ceci ne peut avoir pour origine que la valeur utilisée de l'indice de récolte HI (0.27), représentant assez fidèlement le potentiel productif des variétés cultivées dans la région de Bordj. Cette dernière valeur du HI est calculée à partir des HI déterminés par Ali Dib et Monneveux (1992), sur les deux variétés locales Oued Zenati et Hedba 3 cultivées dans l'étage bioclimatique semi-aride, respectivement à Guelma et à Sétif. A Alger, on assiste plutôt à une légère sous-estimation des rendements du fait du HI utilisé, mal adapté au potentiel productif des variétés de la région.

Chapitre 5. Le climat récent observé et les changements climatiques futurs à Alger et Bordj Bou Arreridj

1. Introduction

Nous apportons dans ce chapitre le traitement ainsi que l'interprétation des résultats de la modélisation du climat, et nous avons mis l'accent sur les précipitations, la température et l'évapotranspiration de référence. Le chapitre commence d'abord par la description des valeurs annuelles et mensuelles interannuelles des différents paramètres climatiques observés dans les deux zones d'étude, et ensuite étudie l'évolution du climat récent par l'analyse décennale des moyennes interannuelles des paramètres climatiques. Il passe après à la comparaison entre le climat actuel simulé par le modèle ARPEGE- CLIMATE et celui réellement observé, pour terminer enfin par la comparaison entre climat futur et climat observé, afin de caractériser l'éventuel changement annuel et saisonnier du climat dans les deux régions d'étude.

2. Le climat récent observé

2.1 .Caractéristiques du climat récent observé

2.1.1. Valeurs interannuelles

La précipitation moyenne interannuelle calculée sur la série historique de la région d'Alger est caractérisée par une moyenne de 642.9 mm et un écart type de 172.3 mm. Celle calculée sur la série observée de la région de Bordj Bou Arreridj est d'une moyenne de 413.1 mm et d'un écart type de 90.5 mm. Les valeurs élevées de l'écart type confirment le caractère irrégulier des précipitations dans les deux régions.

La température moyenne interannuelle à Alger est d'une moyenne de 17.5°C et d'un écart type de 0.61°C. Ces derniers sont de 15.2°C et 0.61°C à Bordj Bou Arreridj.

L'évapotranspiration de référence est caractérisée par une moyenne interannuelle de 1143.8 mm et un écart type de 42.2mm, à Alger. Ces deux paramètres calculés sur la série historique de Bordj Bou Arreridj prennent respectivement les valeurs de 1302.3 mm et 82.7 mm.

Les valeurs de précipitation, température et évapotranspiration de référence indiquées ci-dessus, ainsi que celles des autres variables climatiques (voir Tableau 9), confirment bien la différence de climat entre les deux régions d'étude, et particulièrement la relative aridité de la région de Bordj Bou Arreridj.

2.1.2. Moyennes mensuelles interannuelles

A Alger, les précipitations mensuelles interannuelles augmentent progressivement de l'automne à l'hiver, marquent leur maximum en Décembre (97.3 mm), puis diminuent pour atteindre leurs minima en été, le mois le plus sec étant Juillet avec 3.3 mm (Fig. 17). La pluviométrie cumulée durant le cycle de culture du blé dur (Octobre – Juin) est de 583 mm en moyenne.

Les températures mensuelles interannuelles évoluent entre un minimum de 10.6°C en Janvier et un maximum de 25.7°C en Juillet. Le calcul sur la série climatique observée d'Alger indique une température maximale journalière interannuelle de 35.7°C contre une température minimale journalière interannuelle de 0.5°C.

A Bordj Bou Arreridj, le climat est plus sec et plus chaud. Les précipitations mensuelles interannuelles évoluent entre un maximum de 53.8 mm calculé sur le mois de Décembre et un minimum de 9.9 mm calculé sur le mois de Juillet.

Tableau 9. Moyennes et écarts types interannuels des variables climatiques pour les deux zones d'étude.

Variable climatique	Alger	Bordj Bou Arreridj
Précipitations (mm)	642.9 ± 172.3	413.1 ± 90.5
Température (°C)	17.5 ± 0.61	15.2 ± 0.89
Evapotranspiration de référence (mm)	1143.8 ± 42.2	1302.3 ± 82.7
Humidité relative de l'air (%)	74 ± 5.6	60.6 ± 3.1
Vitesse du vent (m/s)	2.8 ± 0.6	3.9 ± 0.5
Rayonnement solaire (MJm ⁻² j ⁻¹)	16.7 ± 0.7	17.5 ± 0.4

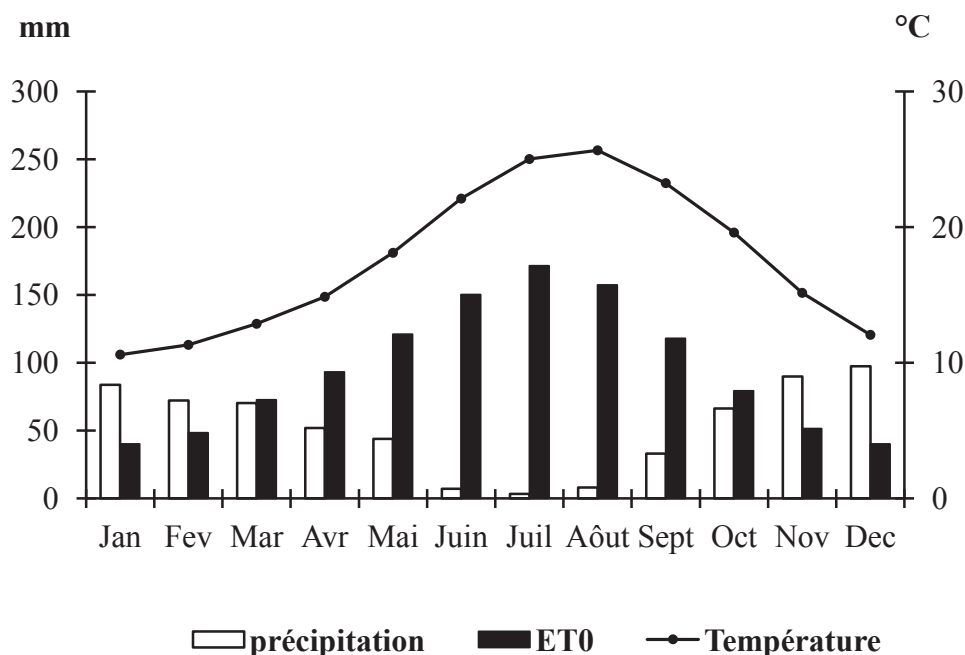


Fig. 17. Moyennes mensuelles interannuelles de précipitations, évapotranspiration de référence et température moyenne de l'air à Alger (données historiques).

Le cumul pluviométrique sur l'ensemble du cycle de la culture du blé n'est que de 301 mm. La saison printanière ne compose que 36 % de ce cumul, imposant une situation très défavorable par rapport aux besoins de la culture (Fig. 18).

La température moyenne mensuelle interannuelle de Bordj Bou Arreridj varie entre la valeur de 5.7°C en Janvier et la valeur de 26.4°C en Juillet. La température maximale journalière interannuelle est de 38.2°C et la température minimale journalière interannuelle de -3.4°C.

L'évapotranspiration de référence évolue de manière inverse aux précipitations dans les deux régions. Elle devient importante à partir du mois de Mai et atteint un maximum de 171.3 mm et 221.2 mm respectivement à Alger et à Bordj Bou Arreridj en Juillet, puis décroît vers les valeurs minimales de 40.1mm et 28.9 mm en Décembre, respectivement à Alger et à Bordj Bou Arreridj (Fig. 17, 18).

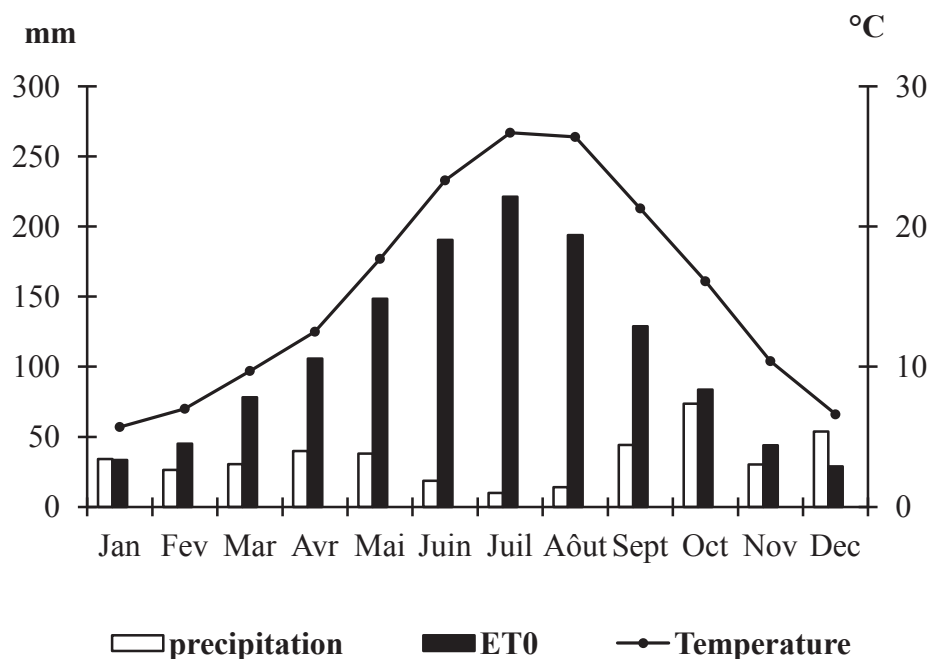


Fig. 18. Moyennes mensuelles interannuelles de précipitations, évapotranspiration de référence et température moyenne de l'air de Bordj Bou Arreridj (données historiques).

Dans les deux zones d'étude, le rayonnement solaire mensuel interannuel augmente de l'hiver à l'été, avec Décembre le mois le moins ensoleillé ($7.9 \text{ MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$) et Juillet le plus ensoleillé ($25.5 \text{ MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$) (Tableau 10, 11).

Les valeurs d'humidité relative de l'air sont plus faibles à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger (Tableaux 10, 11). Elles commencent à diminuer en printemps pour atteindre une valeur minimale de 39 % en Juillet.

La vitesse du vent mensuelle interannuelle suit un rythme inverse en comparaison avec l'humidité relative de l'air (Tableaux 10, 11). Cela concerne particulièrement la région de Bordj Bou Arreridj où les vents au printemps et en été sont plus forts, plus chauds et plus secs et sont appelés *sirocco ou chehili*.

La région de Bordj Bou Arreridj est plus ensoleillée que celle d'Alger, particulièrement à partir du mois de Mars (Tableaux 10, 11). Cette caractéristique permet chez les céréales une meilleure accumulation de la matière sèche et induit donc un meilleur rendement potentiel. C'est ce qui justifie le classement de la région dans les zones potentielles de production de céréales en Algérie.

Tableau 10. Moyennes mensuelles interannuelles de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire à Alger

	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse du vent (m/s)	Rayonnement solaire (MJm⁻²j⁻¹)
Janvier	77	2,7	9
Février	77	2,8	11,5
Mars	76	2,9	15,5
Avril	73	3	19,2
Mai	75	2,9	22
Juin	70	3,1	25
Juillet	70	3	25,6
Août	69	2,9	22,7
Septembre	72	2,7	18,5
Octobre	73	2,4	13,5
Novembre	75	2,6	9,7
Décembre	78	2,9	7,9

Tableau 11. Moyennes mensuelles interannuelles de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire à Bordj Bou Arreridj

	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse du vent (m/s)	Rayonnement solaire (MJm⁻²J⁻¹)
Janvier	75	2,7	9,6
Février	71	2,7	12,7
Mars	66	3,2	16,6
Avril	61	3,3	20,5
Mai	57	3,2	23,4
Juin	47	3,3	25,9
Juillet	39	3,2	26,4
Août	43	3	23,6
Septembre	56	2,8	18,8
Octobre	63	2,6	13,5
Novembre	72	2,7	9,7
Décembre	78	2,7	7,9

2.2. Evolution du climat durant le passé récent

2.2.1. Précipitations

L'examen du passé récent des précipitations dans nos deux zones d'étude montre une diminution du régime pluviométrique à Alger et une augmentation à Bordj Bou Arreridj (Fig. 19).

L'évolution de la série observée à Alger montre que les précipitations annuelles de la première décennie (1978-1987) de 656.1 mm diminuent à 652.6 durant la deuxième décennie (1988-1997), soit de -0.5 %. Durant la troisième décennie (1998-2007), elles diminuent davantage de -5 %, pour arriver à la valeur de 620.1mm. Les études du climat récent menées dans le bassin méditerranéen montrent que les précipitations tendent à augmenter dans le nord de la région et à diminuer dans le sud (Forland et al., 1996 ; Schonwiese et Rapp, 1997).

A Bordj Bou Arreridj, la précipitation moyenne annuelle calculée sur la première décennie de la série observée (1980-1989) est de 344.1mm.

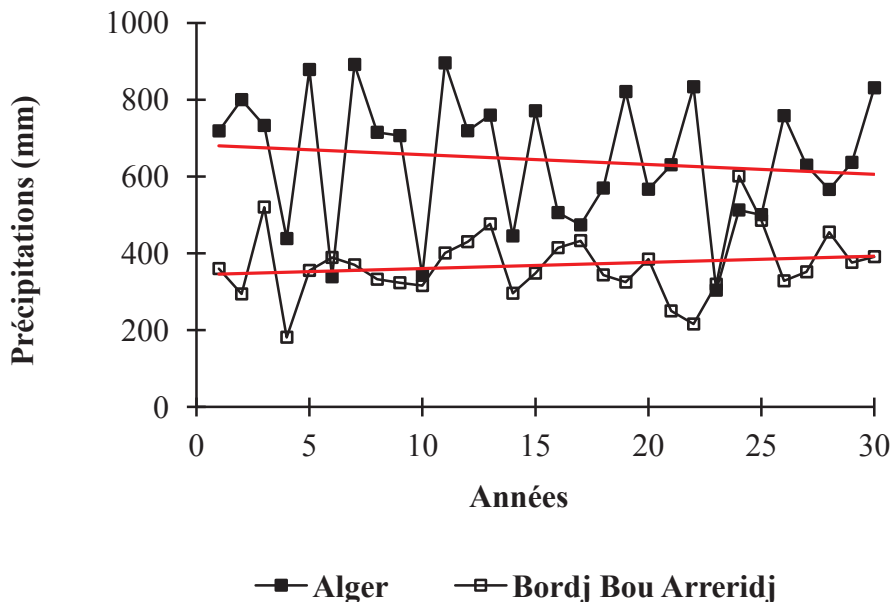


Fig. 19. Evolution des précipitations annuelles durant le passé récent à Alger (1978-2007) et Bordj Bou Arreridj (1980-2009).

Elle augmente significativement à 385.2 mm durant la deuxième décennie (1990-1999), soit un taux de 10.7 %. Durant la troisième décennie, elle diminue légèrement de -2.1 %, pour atteindre la valeur de 377.4 mm. Ces résultats confirment ceux de Brunetti et al. (2002) et Alpert et al. (2002) concernant l'augmentation de l'irrégularité des précipitations dans la partie sud de la zone méditerranéenne ainsi que ceux de Meddi et Talia (2008), Hertig (2004) et Kingumbi et al. (2005), indiquant que la tendance à la décroissance des précipitations n'est pas prononcée dans la partie nord-est de l'Afrique.

2.2.2. Températures

Durant le passé récent, l'évolution de la température moyenne annuelle dans les deux zones d'étude est plutôt croissante (Fig. 20), confirmant ainsi les résultats des différentes études statistiques du climat récent méditerranéen (Kostopoulou and Jones 2005, Ventrella et al., 2012).

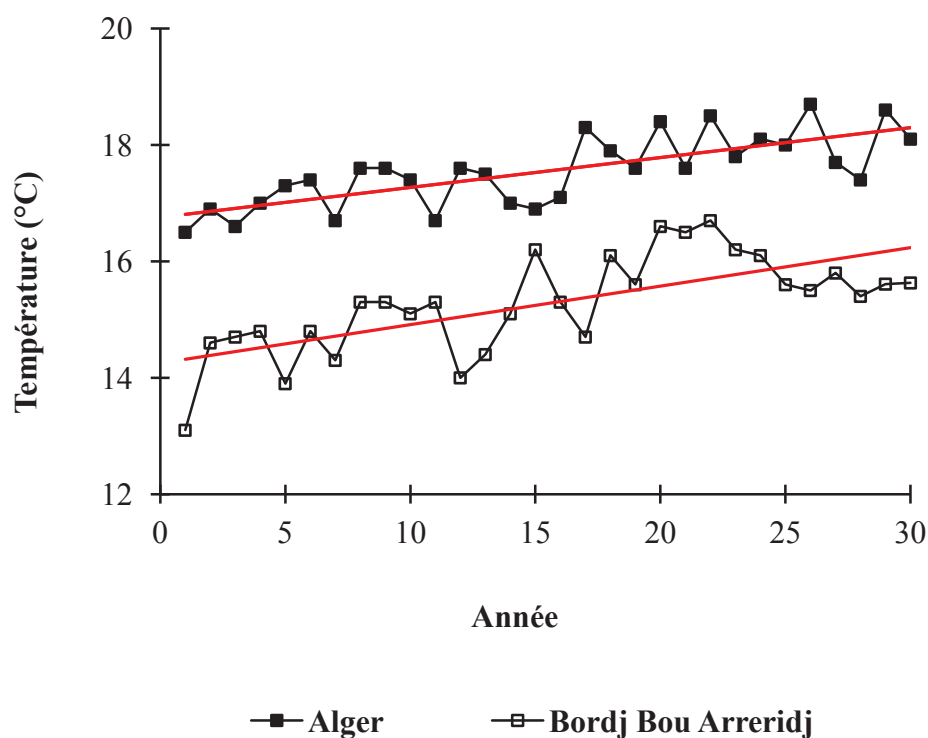


Fig. 20. Evolution des températures moyennes annuelles durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.

A Alger la température moyenne annuelle de l'air durant la première décennie est de 17.1°C, elle augmente de + 0.4°C durant la deuxième décennie puis de +0.5°C durant la troisième décennie. A Bordj Bou Arreridj, le réchauffement climatique est plus ressenti. La température moyenne annuelle passe de 14.6°C durant la première décennie à 15.3°C durant la deuxième décennie, puis à 15.9°C durant la troisième décennie, accusant une augmentation moyenne de 1.3°C durant les 30 années observées.

2.2.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent

Les autres paramètres climatiques ont eux aussi subi certains changements, chose constatée à partir de l'examen des courbes de tendance durant le passé récent.

Dans les deux zones d'étude, l'évolution du rayonnement solaire et de l'humidité relative de l'air durant le passé récent est en parfait accord avec celle de la température. Les courbes de tendance correspondant au rayonnement solaire observé sont légèrement ascendantes indiquant que le rayonnement solaire moyen annuel a sensiblement augmenté ces dernières années (Fig. 21).

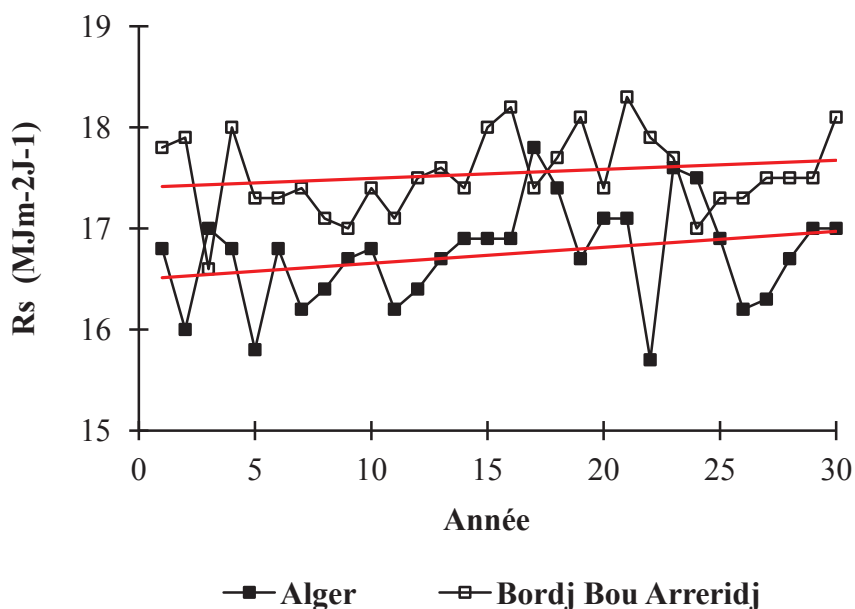


Fig. 21. Evolution du rayonnement solaire moyen annuel durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.

A l'inverse, les courbes de tendance correspondant aux valeurs observées de l'humidité relative de l'air dans les deux régions d'étude sont toutes deux descendantes, ce qui signifie que cette dernière tend à diminuer (Fig. 22). La vitesse du vent a évolué de manière différente dans les deux zones d'étude (Fig. 23).

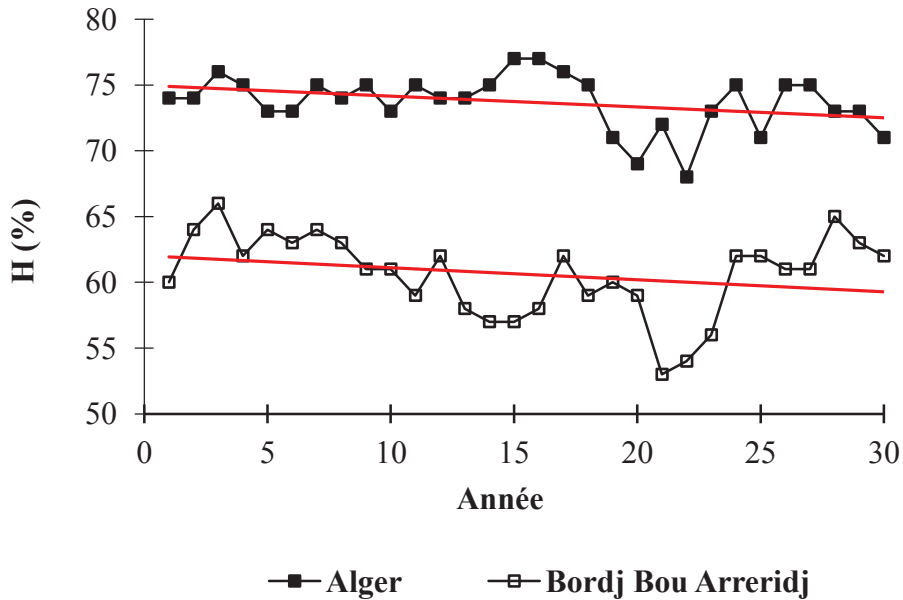


Fig. 22. Evolution de l'humidité relative moyenne annuelle durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.

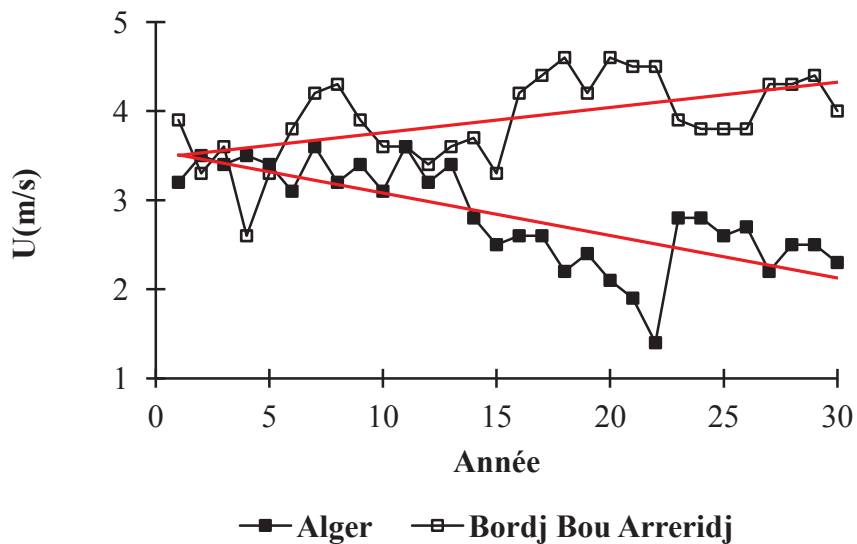


Fig. 23. Evolution de la vitesse de vent moyenne annuelle durant le passé récent à Alger et Bordj Bou Arreridj.

A Alger, la vitesse du vent a diminué de -18.2 % durant la deuxième décennie et de -11.1 % durant la troisième décennie. A l'inverse, à Bordj Bou Arreridj, elle a augmenté de 11.1 % durant la première décennie et de 2.5 % durant la troisième décennie.

3. Le climat actuel simulé

3.1. Températures

Dans les deux sites d'étude, la température mensuelle interannuelle de la période de référence est bien simulée par le modèle ARPEGE (Fig. 24).

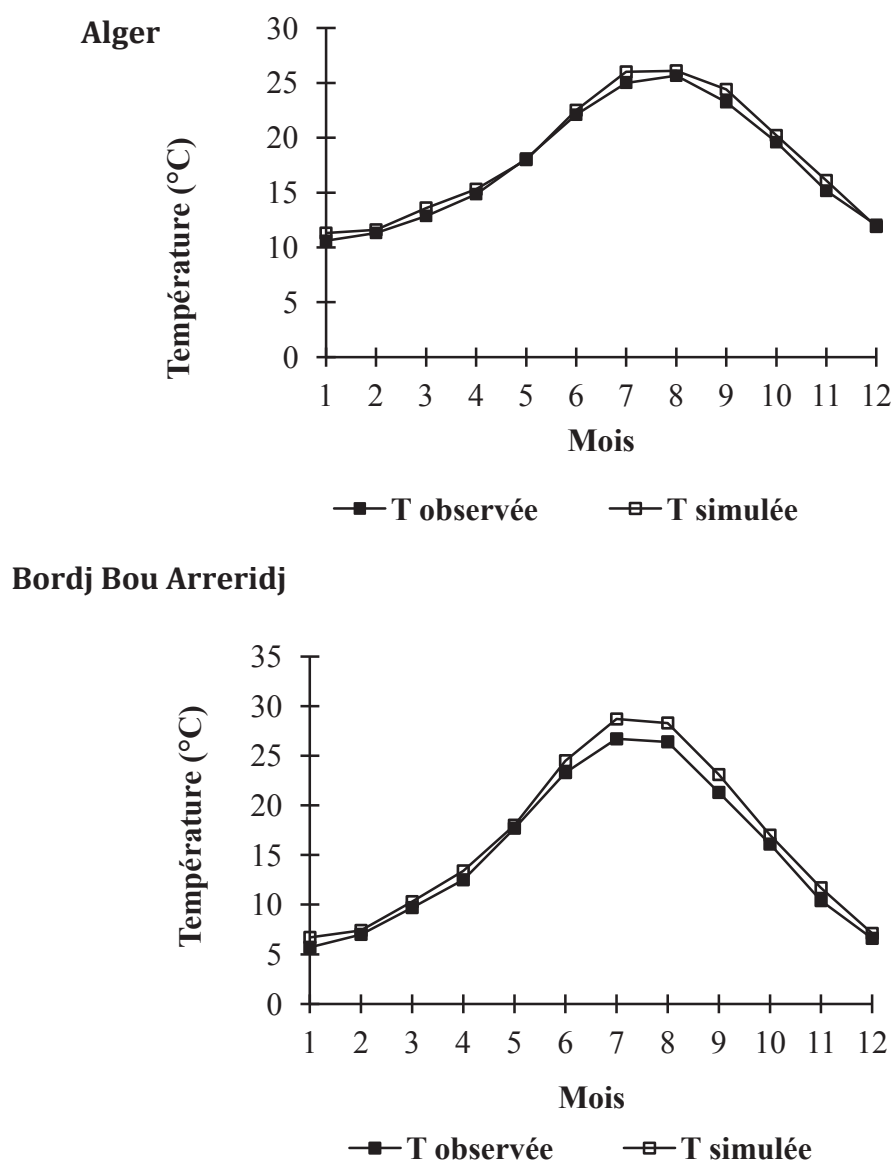


Fig. 24. Comparaison entre climat observé et climat simulé : températures mensuelles interannuelles à Alger et Bordj Bou Arreridj.

Les valeurs simulées évoluent de la même manière que celles observées. Le test de Student-Fisher (à $P < 0.05$) n'indique aucune différence significative entre les deux composantes (Annexe A, Tableau 1).

Le modèle ARPEGE simule bien aussi la température annuelle dans les deux régions d'étude. Cela est vérifié par le test de Student-Fisher, qui indique que les deux moyennes interannuelles observées et simulées ne sont pas significativement différentes à Alger et Bordj Bou Arreridj (Annexe A, Tableau 6).

3.2. Précipitations

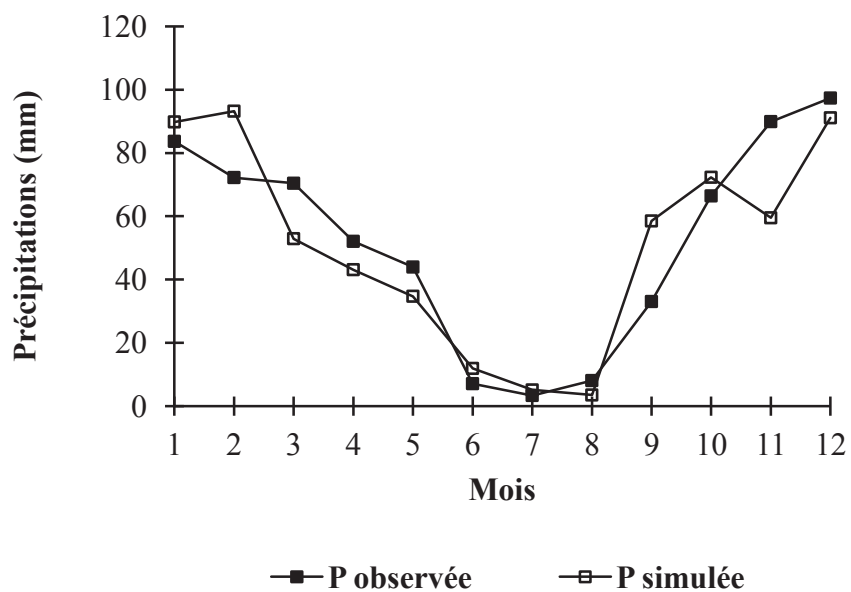
Les valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées dans les deux régions ne sont pas significativement différentes, selon le test de Student-Fisher (à $P < 0.05$) (Annexe A, Tableau 2). Aussi, selon le même test de Student-Fisher (à $P < 0.05$), la moyenne interannuelle observée n'est pas différente de celle simulée dans les deux régions d'étude (Annexe A, Tableau 6).

En comparaison avec les températures, les précipitations mensuelles interannuelles du climat simulé suivent moins bien l'évolution de celles du climat observé (Fig. 25). La précipitation annuelle est surestimée 4 années sur 10 à Alger et 6 sur 10 à Bordj Bou Arreridj. L'analyse de la distribution des précipitations dans différentes régions de l'Algérie montrent une instabilité de la structure dans l'espace et dans le temps (Bouaoune et Dahmani-Megrouche, 2010 ; Hamlaoui-Moulai et al., 2013). Cela rend délicate la comparaison entre les estimations des points grilles du modèle et les points de mesure.

3.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent

Dans les deux régions, les valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées de rayonnement solaire, de l'humidité relative et de la vitesse du vent ne sont pas significativement différentes, selon le test de Student-Fisher (à $P < 0.05$) (Annexe A, Tableaux 3-5). De même, les moyennes interannuelles de rayonnement solaire, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse du vent, observées et simulées ne sont pas significativement différentes selon le test de Student-Fisher (à $P < 0.05$), les détails du test sont reportés en Annexe A (Tableau 6). Les courbes d'évolution des valeurs mensuelles interannuelles simulées de ces trois paramètres climatiques suivent dans l'ensemble celles représentant les valeurs observées (Fig. 26).

Alger



Bordj Bou Arreridj

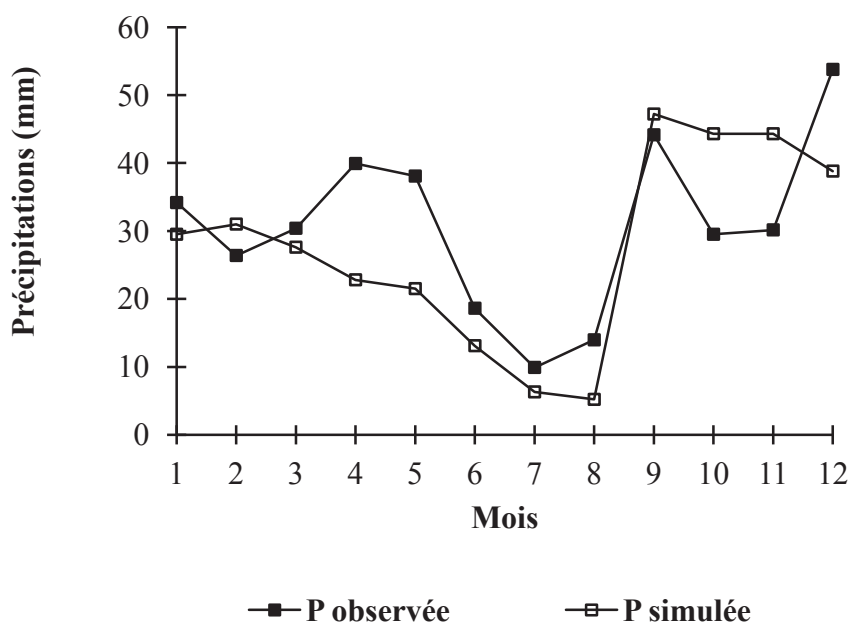
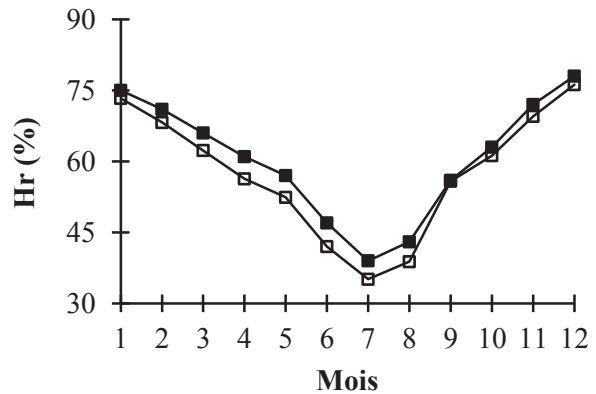
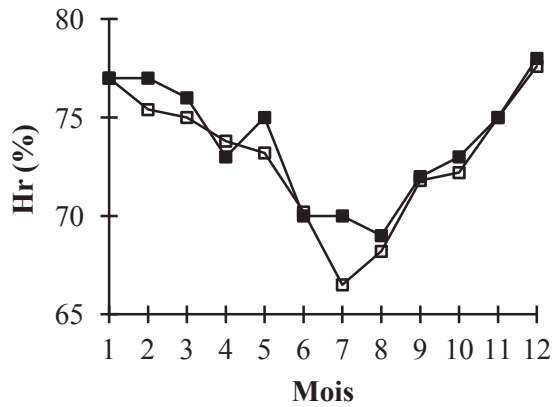
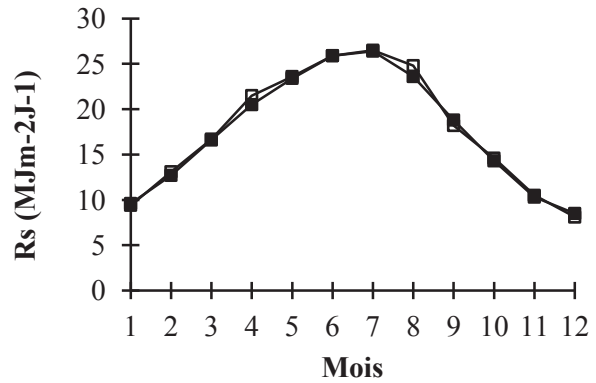
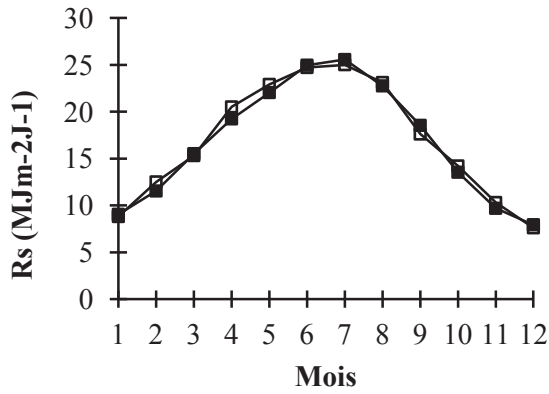


Fig. 25. Comparaison entre climat observé et climat simulé : précipitations mensuelles interannuelles à Alger et Bordj Bou Arreridj.

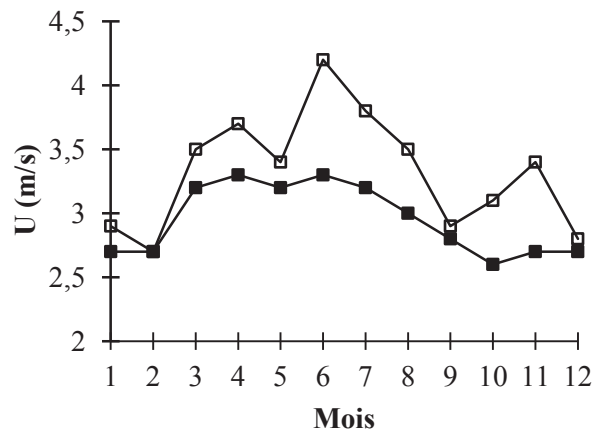
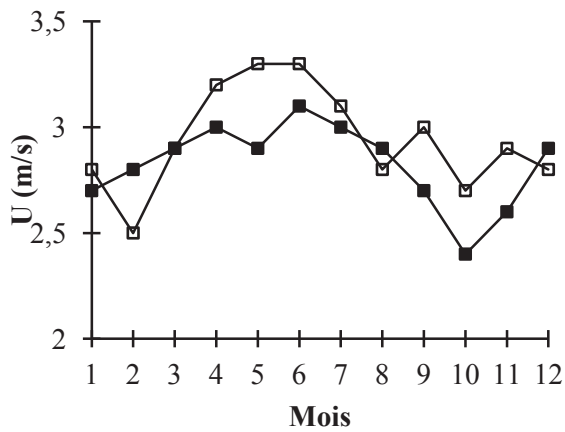
Alger

Bordj Bou Arreridj



■ Valeurs observées □ Valeurs simulées

■ Valeurs observées □ Valeurs simulées



■ Valeurs observées □ Valeurs simulées

■ Valeurs observées □ Valeurs simulées

Fig. 26. Comparaison entre climat observé et climat simulé dans les deux zones d'étude : valeurs mensuelles interannuelles du rayonnement solaire, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse moyenne du vent.

Quelques différences sont cependant remarquées particulièrement concernant la vitesse moyenne du vent. A Bordj Bou Arreridj, on a une tendance à sous-estimation des valeurs mensuelles interannuelles de l'humidité relative de l'air et de la vitesse moyenne du vent (Fig. 26).

4. Le changement climatique futur

4.1. Caractéristiques du climat futur

4.1.1. Température

L'étude du changement climatique est basée sur le calcul des anomalies à partir des scénarios actuels qui s'étendent sur les périodes 1978-2007 et 1980-2009 respectivement pour Alger et Bordj Bou Arreridj, et les scénarios futurs qui concernent la période 1971-2100, pour les deux régions d'étude. A Alger, le modèle ARPEGE prévoit une température moyenne interannuelle de l'ordre de 20.8°C, soit un réchauffement moyen de la zone de 2.7°C vers la fin du 21ème siècle. A Bordj Bou Arreridj, il est prévu que la température moyenne interannuelle atteigne la valeur de 19.6°C, ce qui correspond à un réchauffement de la région de 3.3°C. Dans les deux régions d'étude les températures moyennes mensuelles interannuelles sont clairement plus élevées en comparaison avec le scénario actuel (Tableau 12, Fig. 27).

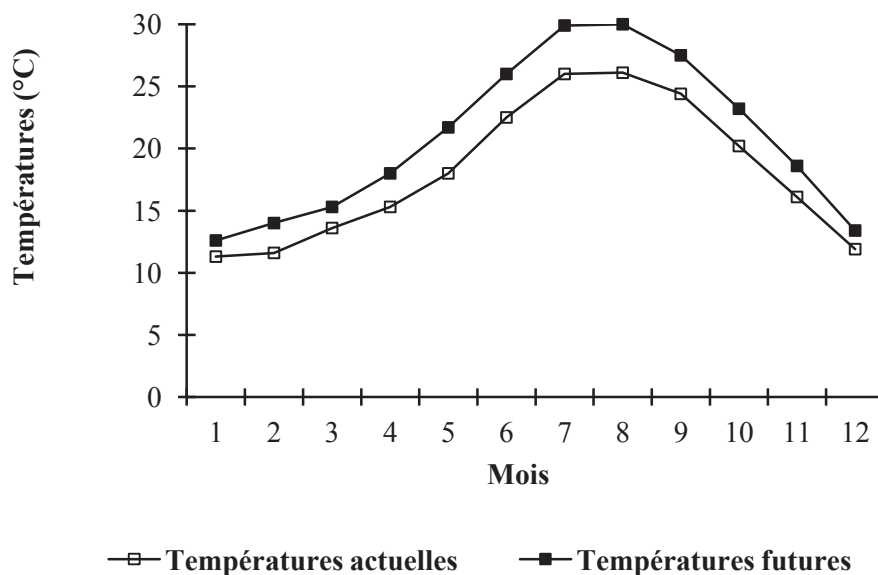
A Alger, le calcul des anomalies entre scénario actuel et futur, indique que la température future augmente systématiquement durant toute l'année. L'augmentation minimale a lieu au mois de Janvier avec +1.3°C, l'augmentation maximale concerne les mois de Juillet et Août avec +3.9°C. A Bordj Bou Arreridj, le réchauffement moyen mensuel minimum concerne toujours le mois de Janvier (+1.2°C).

Tableau 12. Anomalies moyennes mensuelles de la température du climat futur dans les deux régions d'étude.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger												
T(°C)	+1.3	+2.4	+1.7	+2.7	+3.7	+3.5	+3.9	+3.9	+3.1	+3	+2.5	+1.5
Bordj Bou Arreridj												
T(°C)	+1.2	+2.4	+2.3	+3.8	+5.3	+4.3	+4	+4.3	+3.7	+3.7	+2.5	+1.5

Le mois le plus vulnérable au réchauffement climatique dans la région est Mai avec $+5.3^{\circ}\text{C}$.

Alger



Bordj Bou Arreridj

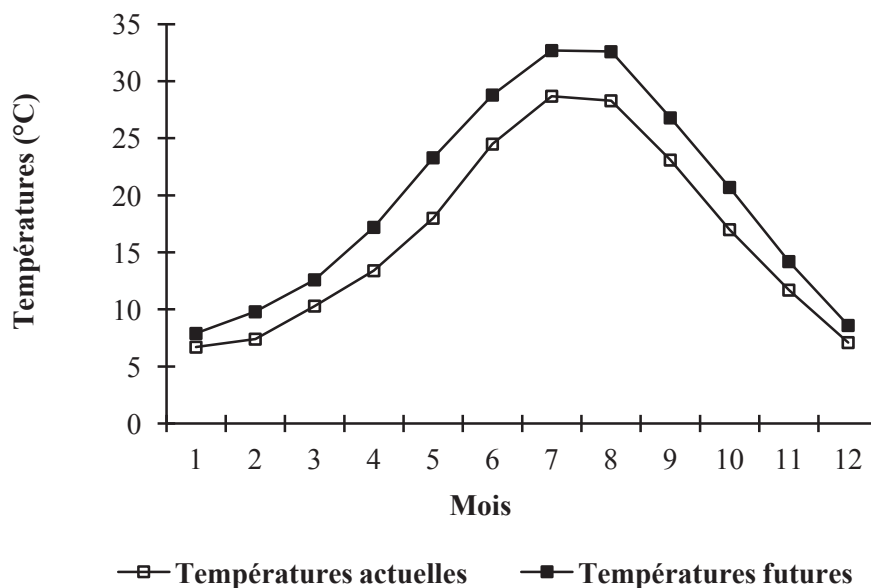


Fig. 27. Températures moyennes mensuelles interannuelles du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.

4.1.2. Précipitations

A l'inverse des températures, les précipitations mensuelles interannuelles futures diminuent globalement dans les deux sites d'étude (Tableau 13, Fig. 28) avec quelques exceptions qui concernent plus la région de Bordj Bou Arreridj.

Les précipitations annuelles à Alger diminuent de -18 %. A l'exception d'une augmentation en Octobre (+6 %), les précipitations mensuelles interannuelles diminuent tout au long de l'année avec une décroissance maximale en Juin et Juillet (supérieure à - 40 %).

A Bordj Bou Arreridj, les calculs indiquent une diminution moyenne des précipitations de -8 %. La diminution est minimale en Février (-13 %) et maximale en Avril (-45 %). Du mois de Juin au mois d'Octobre les anomalies indiquent plutôt une augmentation des précipitations futures avec un maximum de +54 % au mois de Juillet.

4.1.3. Evapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence future augmente systématiquement dans les scénarios futurs des deux régions d'étude (Tableau 14, Fig. 29).

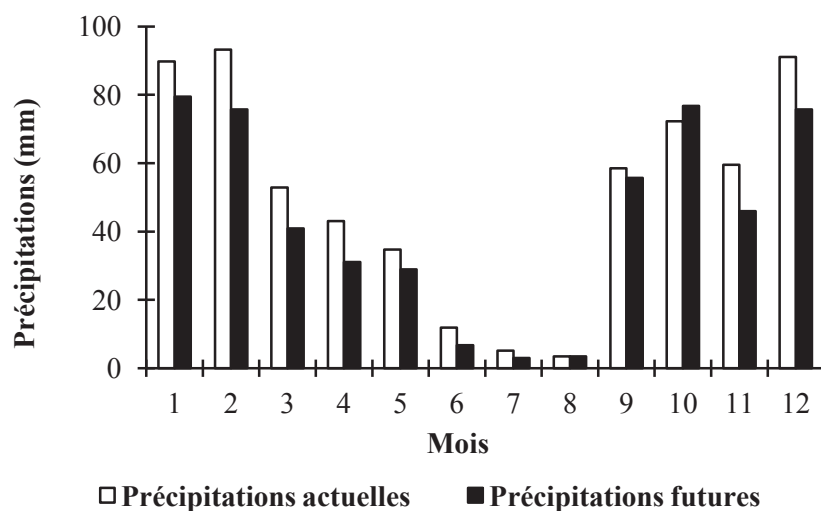
A Alger, la valeur moyenne annuelle augmente de +11 %. Elle est à son minimum en Décembre et Janvier (+2 %) et atteint son maximum en Avril et Mai (+16 %).

A Bordj Bou Arreridj, l'évapotranspiration moyenne annuelles augmente de +10 %, avec un minimum en Janvier (0 %) et un maximum atteint en Avril et Mai (+24 %).

Tableau 13. Anomalies moyennes mensuelles des précipitations du climat futur dans les deux régions d'étude.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger												
P (%)	-11	-19	-23	-28	-17	-44	-41	0	-5	+6	-23	-17
Bordj Bou Arreridj												
P (%)	+4	-13	-32	-45	-22	+30	+54	+28	+8	+16	-23	-23

Alger



Bordj Bou Arreridj

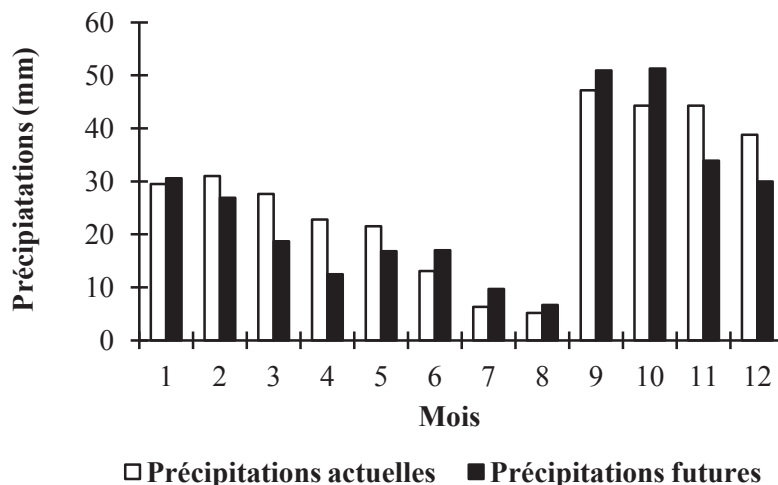
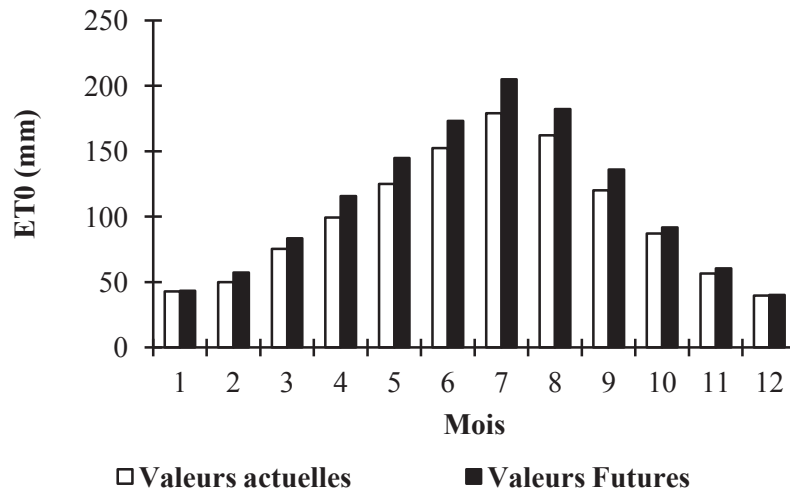


Fig. 28. Précipitations moyennes mensuelles interannuelles du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.

Tableau 14. Anomalies moyennes mensuelles de l'évapotranspiration de référence du climat futur dans les deux régions d'étude.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger												
ET ₀ (%)	+2	+15	+11	+16	+16	+14	+15	+12	+13	+5	+7	+2
Bordj Bou Arreridj												
ET ₀ (%)	0	+16	+13	+24	+24	+7	+6	+5	+17	+2	+9	+2

Alger



Bordj Bou Arreridj

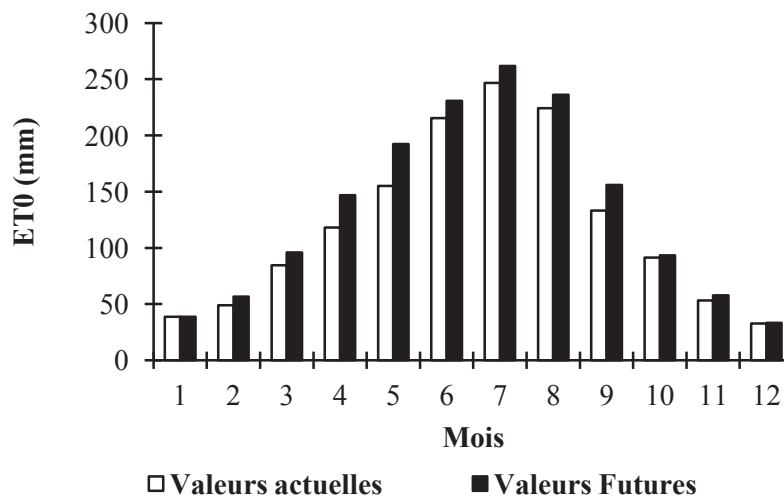
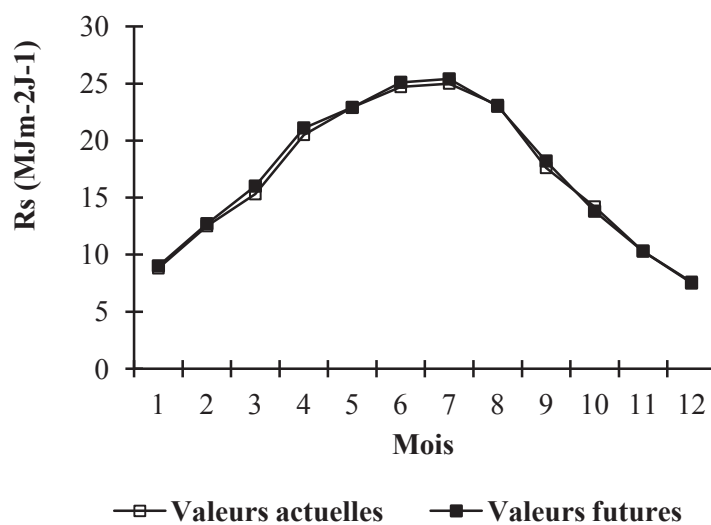


Fig. 29. Evapotranspirations de référence mensuelles interannuelles du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj

4.1.4. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent

Dans le scénario futur le rayonnement solaire moyen mensuel augmente de +1 % dans les deux zones d'étude (Fig. 30). A Alger, l'augmentation maximum concerne les mois de Mars et Septembre.

Alger



Bordj Bou Arreridj

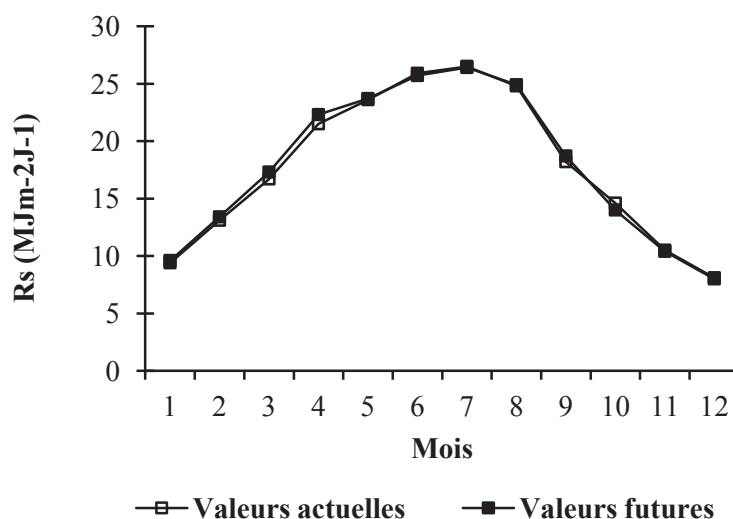


Fig. 30. Rayonnement solaire moyen mensuel interannuel du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.

Pour les deux sites d'étude, les anomalies calculées entre scénario futur et scénario actuel concernant le rayonnement solaire ainsi que l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent sont résumées dans le Tableau 15.

Tableau 15. Anomalies moyennes mensuelles du rayonnement solaire moyen, humidité relative moyenne de l'air et vitesse moyenne du vent, du climat futur dans les deux régions d'étude.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger												
R _s (%)	+2	+2	+4	+3	0	+2	+2	0	+4	-3	0	-1
H(%)	-1	-4	-2	-4	-2	-2	-3	-1	-1	2	-1	0
U(%)	-17	-6	-4	+4	+7	+6	+3	+5	+5	+9	-1	+4
Bordj Bou Arreridj												
R _s (%)	+2	+2	+4	+4	0	-1	0	0	+3	-4	-2	-1
H(%)	0	-5	-6	-13	-13	-1	+1	-6	-3	+4	+2	0
U(%)	-14	-3	-5	+3	+11	-5	-3	-2	0	-7	-13	-15

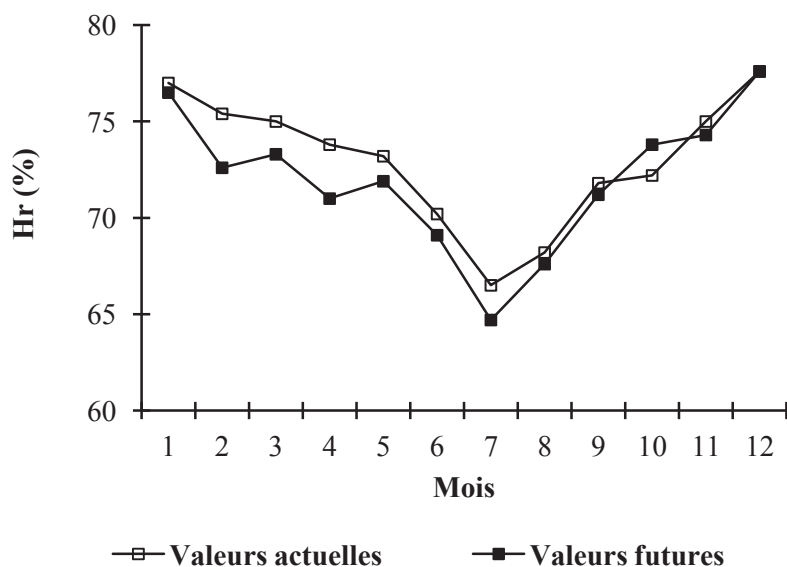
A Alger, l'augmentation du rayonnement solaire est de +2 % en Janvier, Février, Juin et Juillet, elle est en moyenne de +3.5 % en Mars, Avril et Septembre. La variation du rayonnement solaire dans la région est nulle en Mai, Août et Novembre. En Octobre, les anomalies indiquent plutôt une diminution de -3 % .

A Bordj Bou Arreridj, le maximum d'augmentation du rayonnement solaire a lieu durant les mois de Mars et Avril. Le minimum est sur Janvier et Février et aucun changement concernant Mai, Juin et Août. Les mois de Juin, Novembre, Décembre et particulièrement Octobre (-4 %), sont plutôt marqués par une diminution du rayonnement solaire moyen.

L'humidité relative moyenne mensuelle de l'air, en réponse aux augmentations de température, diminue globalement au cours de l'année dans les deux site d'étude (Fig. 31, Tableau 15). A Alger la décroissance moyenne annuelle future est de -2 %, elle est nulle en Décembre et maximale en Février et Avril (-4 %).

A Bordj bou Arreridj le calcul des anomalies indique que l'humidité moyenne annuelle décroît de -3 % dans le futur. Cette décroissance est nulle en Décembre et Janvier et maximale en Avril et Mai (-13 %). En Juillet, Octobre et Novembre les calculs indiquent une augmentation de l'humidité relative de l'air de +1 %, +4 % et +2 % respectivement durant ces trois mois.

Alger



Bordj Bou Arreridj

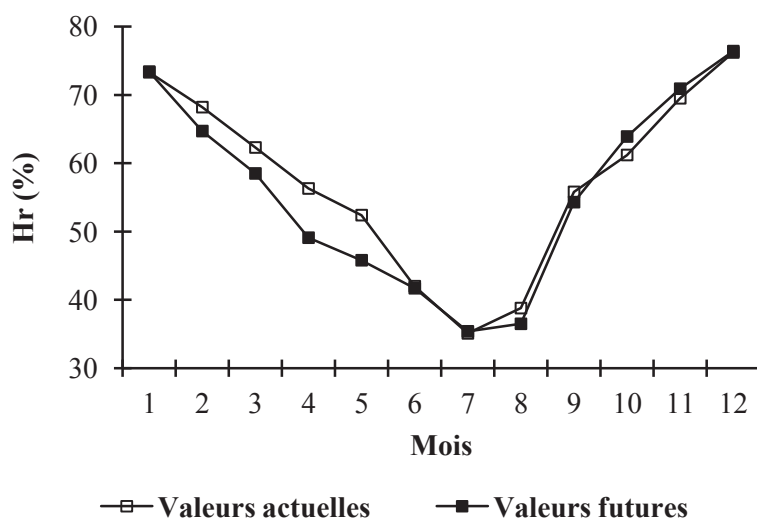
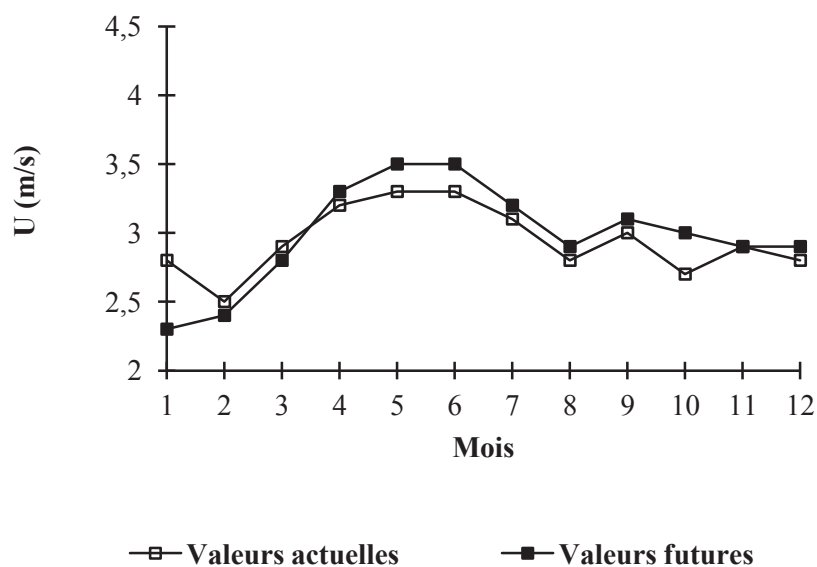


Fig. 31. Humidité relative moyenne mensuelle interannuelle du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.

Le calcul des anomalies indique globalement une augmentation de la vitesse moyenne du vent à Alger et sa diminution à Bordj Bou Arreridj (Fig. 32, Tableau 15), dans le scénario futur en comparaison avec le scénario actuel.

Alger



Bordj Bou Arreridj

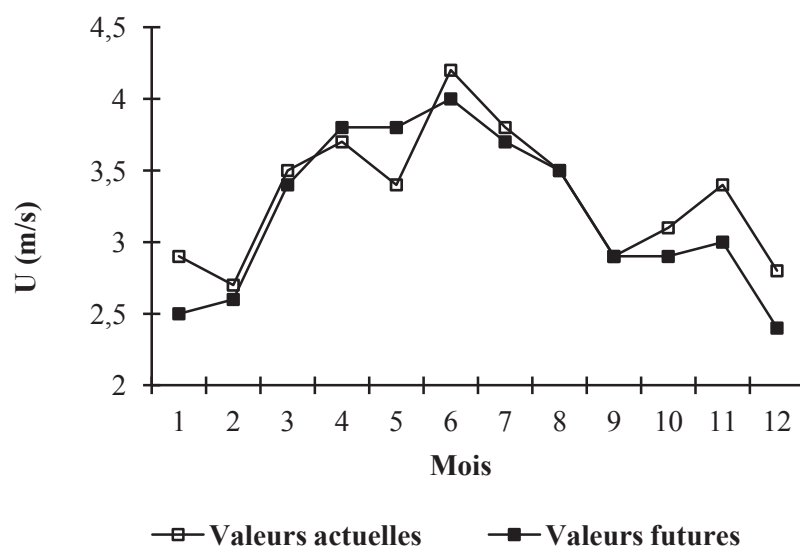


Fig. 32. Vitesse moyenne mensuelle interannuelle du vent du climat actuel et futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.

A Alger, l'augmentation de la vitesse moyenne interannuelle du vent est de +1 %, l'augmentation est maximale en Octobre et minimale en Juillet.

En Janvier et Février on assiste plutôt à une diminution future de la vitesse moyenne du vent, respectivement de -17 % et -6 %.

A Bordj Bou Arreridj, le calcul des anomalies indique une diminution de la vitesse moyenne interannuelle du vent de -4 %. La diminution est maximale en Décembre et Janvier (-15 % et -14 %), elle est minimale en Juillet et Août (-3 % et -2 %) et nulle en Septembre. Exceptionnellement, les calculs montrent une augmentation future de la vitesse moyenne du vent en Avril (+3 %) et en Mai (+11 %).

4.2. Les tendances saisonnières du climat futur

4.2.1. Température

Le réchauffement moyen du globe indiqué par l'IPCC (2007) durant la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999 selon le scénario A1B, est de l'ordre 2.8°C (IPCC, 2007). Ce seuil est déjà atteint à Alger, et est dépassé de 0.5°C à Bordj Bou Arreridj. Nos résultats confirment ainsi les prédictions de l'IPCC (2013) qui indiquent que le réchauffement climatique de la région sud méditerranéenne vers la fin 2100, dépassera celui attendu à l'échelle du globe.

Dans les deux régions d'étude, le réchauffement est minimum en hiver (+1.7°C). Le maximum est en été avec une augmentation prévue de la température moyenne de la saison de 3.8°C à Alger et allant jusqu'à 4.2°C à Bordj Bou Arreridj (Fig. 33).

Ces résultats confirment les conclusions du 4^{ème} rapport de l'IPCC (2007), qui indiquent que les modèles climatiques pour tous les scénarios d'émissions s'accordent sur le fait que le réchauffement maximum de la région Nord-Africaine concernera la saison estivale.

Après l'été, c'est l'automne qui est susceptible de subir un réchauffement important (+2.9°C) à Alger, ce qui est en accord avec les résultats de Schilling et al. (2012). A Bordj Bou Arreridj, après l'été, c'est plutôt le printemps qui se réchauffe particulièrement. Le calcul des anomalies montre une élévation moyenne de la température de +3.8°C durant cette dernière saison.

4.2.2. Précipitations

Les anomalies calculées pour les deux zones d'étude indiquent une décroissance du régime pluviométrique (Fig. 34). Elles viennent confirmer ainsi la diminution des précipitations

futures dans la partie sud du bassin méditerranéen indiquée dans les rapports de l'IPCC (2007, 2013).

La décroissance des précipitations hivernales projetée dans la région méditerranéenne et Nord Africaine (Giorgi and Lionello, 2008; Paeth et al., 2009) est confirmée dans les deux zones d'étude. Les calculs indiquent que l'automne est la saison la moins affectée par cette décroissance du régime pluviométrique futur.

Fig. 33 Tendances saisonnières des températures moyennes futures à Alger et Bordj Bou Arreridj.

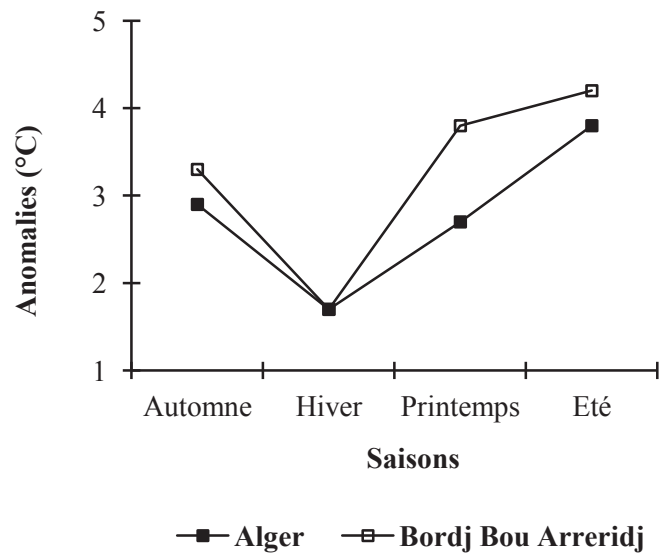
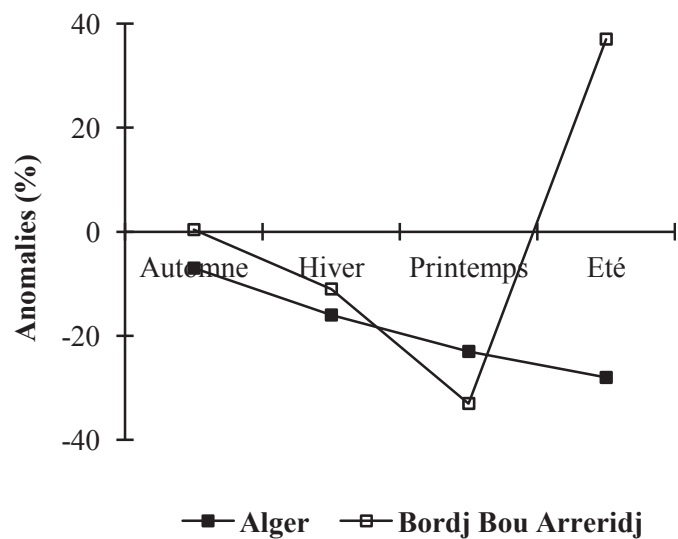


Fig. 34. Tendances saisonnières des précipitations moyennes futures à Alger et Bordj Bou Arreridj.



Les projections montrent que l'été deviendra de plus en plus sec à Alger (-28 %). A l'inverse, à Bordj Bou Arreridj, cette saison semble bénéficier dans le futur d'une remarquable augmentation pluviométrique (+37 %).

Le printemps est négativement affecté par les changements du régime pluviométrique (-23 %) à Alger. A Bordj Bou Arreridj, avec une décroissance des précipitations de -33 %, le printemps semble devenir la saison la plus sèche de l'année dans le futur.

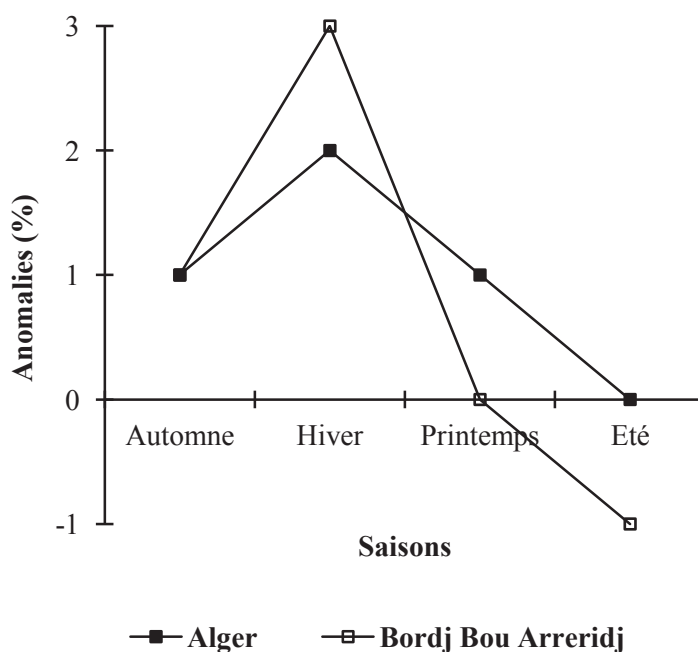
4.2.3. Rayonnement solaire, humidité relative de l'air et vitesse du vent

Dans le scénario futur, le rayonnement solaire moyen mensuel augmente dans les deux zones d'étude avec un maximum de +2 % et +3% durant la saison printanière, respectivement à Alger et Bordj Bou Arreridj (Fig. 35).

L'hiver dans le futur bénéficiera d'une augmentation du rayonnement solaire moyen de +1 % dans les deux sites d'étude.

En été, le rayonnement solaire moyen augmente à Alger (+1%) et ne semble pas changer à Bordj Bou Arreridj.

Fig. 35. Tendances saisonnières du rayonnement solaire moyen futur à Alger et Bordj Bou Arreridj.



En automne, le calcul n'indique aucun changement à Alger et une décroissance de -1 % à Bordj Bou Arreridj.

L'humidité relative moyenne de l'air décroît à Alger de -2 % en hiver, au printemps et en été (Fig. 36), mais ne change pas en automne.

A Bordj bou Arreridj, l'humidité moyenne diminue de -2 % en hiver et en été. La décroissance au printemps est remarquable (-11 %). L'automne est marqué plutôt par une légère augmentation de l'humidité relative moyenne de l'air dans le scénario futur (+1 %) en comparaison avec le scénario actuel.

A Alger, l'augmentation de la vitesse moyenne du vent concerne le printemps, l'automne et particulièrement l'été où le maximum est atteint avec +5 % (Fig. 37). En hiver les calculs indiquent plutôt une diminution de la vitesse moyenne du vent de -6 %.

A Bordj Bou Arreridj, la vitesse moyenne du vent diminue de plus en plus en allant de l'été vers l'hiver, où la diminution est à son maximum (-11 %).

Fig. 36. Tendances saisonnières de l'humidité relative moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.

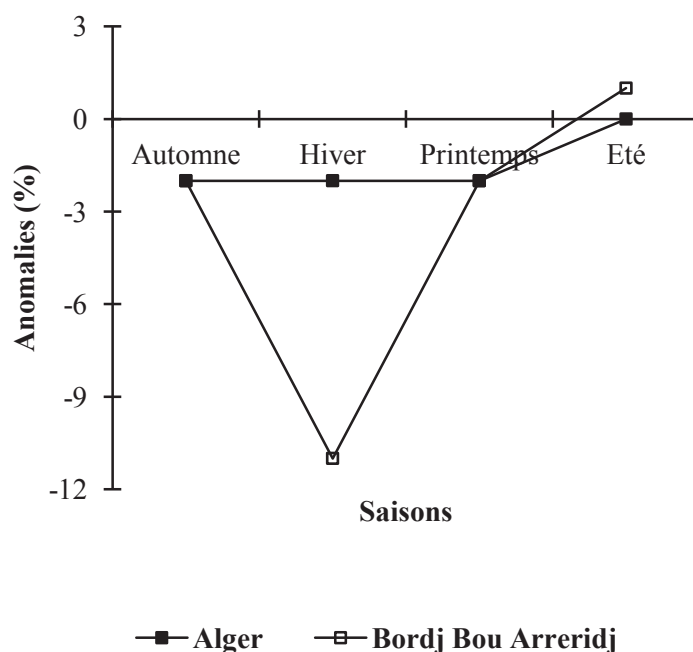
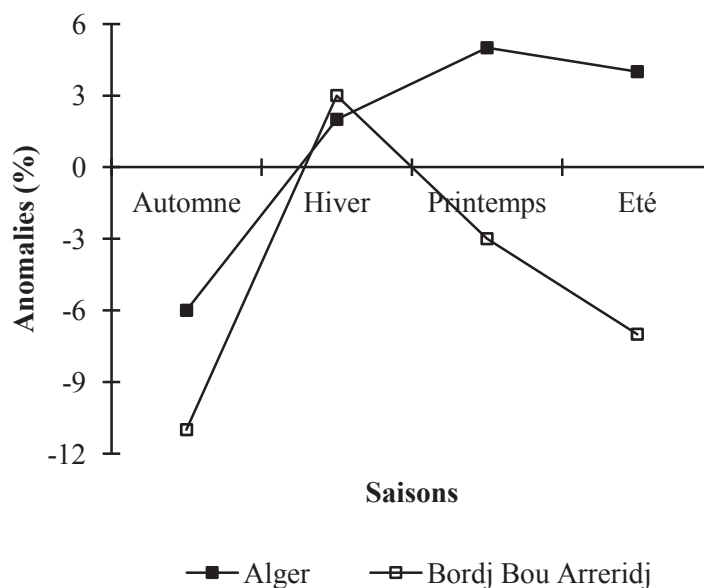


Fig. 37. Tendances saisonnières de la vitesse du vent moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.



Le printemps est plutôt marqué par une augmentation future de la vitesse moyenne du vent (+3 %).

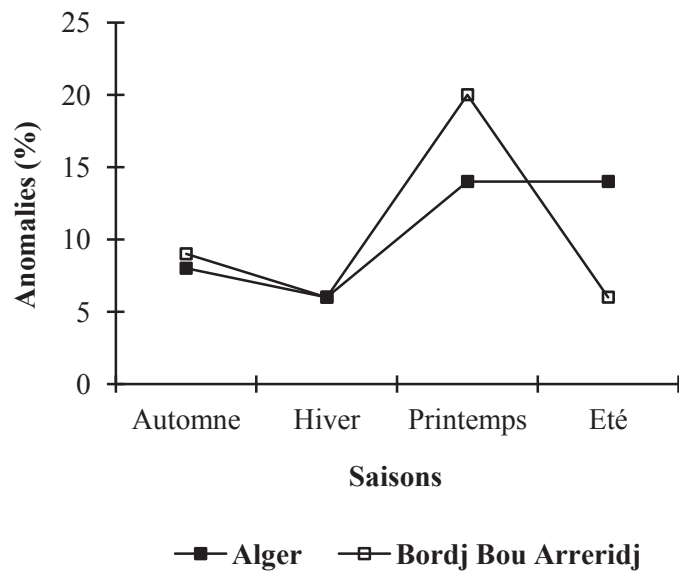
4.2.4. Evapotranspiration de référence

L'évolution saisonnière future de l'ET₀ suit bien l'évolution saisonnière future des différents paramètres climatiques utilisés pour son calcul dans la formule de référence de la FAO (Allen et al., 1998).

A Alger, les anomalies indiquent que l'évapotranspiration de référence augmente dans le futur avec un maximum au printemps et en été (+14 %) et un minimum en hiver (+6 %) (Fig. 38). En effet, l'été à Alger, comme cela été discuté antérieurement, est la saison correspondant aux changements les plus sévères.

A Bordj Bou Arreridj, l'augmentation au printemps est remarquable (+20 %). Cela découle de variations extrêmes des conditions climatiques (température maximale, rayonnement solaire moyen maximum, humidité relative moyenne de l'air minimale et vitesse du vent maximale). En automne comme en hiver, son augmentation est minimale (+6 %), en accord avec le rythme saisonnier futur des autres paramètres climatiques.

Fig. 38. Tendances saisonnières de l'évapotranspiration de référence moyenne future à Alger et Bordj Bou Arreridj.



5. Conclusion

Les résultats de l'analyse du passé récent indiquent la présence d'un changement climatique particulièrement concernant la précipitation et la température. La température a augmenté dans nos deux zones d'étude. La précipitation a diminué à Alger mais a augmenté à Bordj Bou Arreridj.

A l'exception des précipitations, l'ensemble des paramètres climatiques est bien simulés par le modèle ARPEGE-CLIMATE. En effet la pluviométrie en région nord Africaine est bien connue par son caractère aléatoire dans l'espace et dans le temps, ce qui rend sa reproduction plus difficile en comparaison aux autres paramètres climatiques.

Le changement climatique futur est indiqué être différent dans nos deux zones d'étude. Alger est projetée devenir plus chaude et plus sec. Bordj Bou Arreridj, située à l'étage bioclimatique semi aride, est indiquée devenir encore plus aride dans le contexte du changement climatique futur. L'augmentation des températures est indiquée être plus importante à Bordj Bou Arreridj, mais la diminution des précipitations sera plus sévère à Alger.

La distribution saisonnières de l'ensemble des paramètres climatiques est montrée subir un changement au futur. Nos résultats, particulièrement, ceux qui concernent les températures et les précipitations, montrent une variation considérable future. Dans les deux zones d'étude, le printemps est indiqué devenir particulièrement chaud et sec. A l'inverse, Bordj Bou Arreridj, semble pouvoir bénéficier d'étés plus doux au futur. Cette variation sera sans doute bénéfique pour la culture des céréales à Bordj Bou Arreridj, où la saison des pluies est projetée commencer tôt en fin d'été.

Chapitre 6. Les impacts du changement du climat sur la culture du blé dur à Alger et à Bordj Bou Arreridj

1. Introduction

Le changement climatique étant constaté et confirmé dans nos deux zones d'études, nous abordons ici l'étude de son impact sur la culture de blé dur. Quatre principaux aspects sont traités: l'impact sur la date de semis, sur le développement de la culture, sur les paramètres hydriques de la plante et du sol et enfin sur l'accumulation de la biomasse et le rendement en grain.

2. Impact du changement climatique sur le semis

L'échec du semis ne concerne en fait que le cas où la date de semis est non prescrite. Dans ce choix, le modèle stipule que la condition de réussite du semis dépend de l'accomplissement d'une certaine quantité de pluie. La culture est semée, en effet, si pendant cinq jours consécutifs ($N_s = 5$) une précipitation cumulée minimale P_s de 20 mm survient. Si ce critère n'est pas rempli, il y a échec du semis. Cette condition doit cependant arriver durant la fenêtre de semis déterminée dans le modèle (voir Chapitre 3, section : 3.1). Les résultats relatifs à l'échec du semis pour la situation actuelle et la situation future, dans les deux régions d'étude, sont regroupés dans le Tableau 16.

A Alger aucune situation d'échec du semis n'est constatée, que ce soit dans le scénario actuel ou futur. En effet, dans cette région caractérisée par un climat subhumide et des sols profonds, les conditions hydriques actuelles sont favorables et permettent le succès du semis.

Tableau 16. Taux d'échec du semis dynamique correspondant aux situations actuelle et future, à Alger et Bordj Bou Arreridj

	Echec du semis (%)	
	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	0	24
Situation future	0	0

Dans le scénario futur, l'automne s'avère être la saison la moins vulnérable à la diminution des précipitations (voir Chapitre 4, section : 2.2.2) et les conditions actuelles favorables aux semis devraient persister dans le futur.

A Bordj Bou Arreridj et dans la situation présente, il y a eu échec du semis 7 années sur 29, soit un taux d'échec de 24 %. Dans la situation future, ce pourcentage s'annule. Ces résultats montrent que les conditions de semis présentes sont peu favorables actuellement, mais s'améliorent dans le futur. Les augmentations de pluies attendues en été et automne auront sans doute un effet positif sur la réserve hydrique du sol, d'où l'amélioration des conditions de semis dans la région.

3. Impact du changement climatique sur le développement de la culture

Comme il a été expliqué antérieurement, le modèle considère deux scénarios concernant le déroulement du cycle de la culture : soit un accomplissement normal (théorique) du cycle, soit une interruption du cycle par un stress hydrique avant son accomplissement normal. Nous allons dans ce qui suit examiner ces deux cas séparément.

3.1. Cas de l'accomplissement normal du cycle de culture

3.1.1. Dates de semis

Etant donné que la date de semis est fixée au 1^{er} Novembre dans le deuxième cas de semis, le décalage de la date de semis ne concerne que la situation de date de semis non prescrite (date de semis dynamique), (Tableau 17).

A Alger, la date moyenne de semis recule du 17 Novembre au 7 Octobre, soit de 41 jours, entre la situation présente et la situation future. Cela est dû au fait que les conditions hydriques requises pour la réalisation du semis surviennent plus tôt dans le contexte du changement climatique par rapport au climat présent.

Tableau 17. Dates de semis dans les situations actuelle et future, dans les deux régions d'étude.

	Semis non prescrit		Semis prescrit	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	321±10	330±21	305	305
Situation future	280±52	293±19	305	305

En effet, le mois d'Octobre devrait bénéficier d'une augmentation des précipitations de +6 % (voir Chapitre 4, section : 2.1.3).

A Bordj Bou Arreridj, elle se déplace du 26 Novembre au 20 Octobre, soit de 37 jours entre la situation actuelle et la situation future. Dans la situation actuelle, bien que la fenêtre de semis soit relativement large (du 1^{er} Novembre au 31 Décembre), les possibilités offertes par le climat pour répondre à la quantité de pluie requise pour les semis restent faibles. Par contre, avec une fenêtre de semis plus large (du 1er Octobre au 31 Janvier) et la distribution future des précipitations, plus avantageuse en été et en début d'automne, le climat futur améliore la probabilité de succès du semis dynamique dans la région.

Ces résultats montrent que le semis dynamique sera plus précoce dans le futur dans les deux sites d'étude. En effet le semis précoce est bénéfique pour la culture car il permet d'échapper aux périodes de stress hydrique et thermique survenant vers la fin du cycle de culture (Rosenzweig and Tubiello, 1997).

3.1.2. Réalisation dans le temps des phases végétatives et reproductives

3.1.2.1. Cas d'un semis dynamique

Dans les deux régions d'étude, les résultats montrent que le changement climatique futur influe aussi bien sur les dates de réalisation des différentes phases phénologiques que sur leur durée. Il induit automatiquement des changements concernant les phases végétative et reproductrice.

A Alger, dans le cas où la date de semis est dynamique, la phase végétative dans la situation actuelle s'étale du 17 Novembre (D1 : date de semis) au 16 Février (D3 : stade montaison), soit sur une durée de 92 jours (Tableau 18). Dans le scénario futur, elle débute le 7 Octobre et s'achève le 29 Novembre, déterminant une durée de 54 jours seulement. La phase végétative est raccourcie de 38 jours qui concernent plus son début ; la phase L1 avec 29 jours ; la L2 avec 9 jours. La période végétative dans les conditions actuelles se réalise durant la période mi-automne-mi-hiver. Mais l'avancement de la date de semis dans le scénario futur induit son déplacement dans le temps. Elle se déroule complètement durant les deux derniers mois de l'automne, saison la plus chaude dans le cycle du blé, dans le contexte du changement du climat à Alger.

Tableau 18. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Alger (cas de semis non prescrit).

	Phase végétative		Phase reproductive	
	Période 1	Période 2	Période	Période
	L1 : (D1-D2)	L2 : (D2-D3)	L3 : (D3-D4)	L4 : (D4-D5)
Situation actuelle	17Nov.-7 Jan. 52 jours	7 Janv. – 16 Fév. 40 jours	16 Fév. – 12 Avr. 55 jours	16 Fév. – 12 Avr. 41 jours
Situation future	7Oct.–29 Oct. 23 jours	29 Oct.- 29 Nov. 31 jours	29 Nov. – 2 Fév. 65 jours	2 Fév. – 27 Mar. 52 jours

En effet, l'augmentation projetée de la température de 2.7 durant Octobre et Novembre, est suffisante pour accumuler les 700 °C nécessaires à la réalisation de la phase végétative, en seulement 54 jours au lieu de 92 jours (Fig. 39).

Dans la situation actuelle, la phase reproductive a une durée moyenne de 96 jours (du 16 Février au 14 Mai), qui devient 117 jours dans le scénario futur (du 29 Novembre au 27 Mars). A l'inverse de la phase végétative, la phase reproductive est plus longue de 21 jours. Cette phase est la combinaison de deux phases : la première (L3) s'étend de la montaison à la floraison (D4), et la deuxième (L4) de la floraison (D4) à la maturation ; et nos résultats montrent que la contribution de chacune de ces deux phases à l'allongement futur constaté est la même.

La période reproductive a lieu dans la situation actuelle du milieu de l'hiver jusqu'à la fin du printemps. Dans le scénario futur, elle se déplace pour occuper tout l'hiver et se terminer vers le début du printemps. En effet, même avec le réchauffement futur, les températures correspondant à cette phase dans le scénario futur sont plus faibles que celles dans le climat présent. Et de ce fait, l'accumulation de la somme considérable de 1750 °C, nécessaire à l'accomplissement de la phase reproductive, prendra plus de temps dans la situation future que dans la situation actuelle.

A Bordj Bou Arreridj, dans la situation actuelle, la phase végétative dure en moyenne 107 jours et couvre la période du 26 Novembre au 28 Janvier (Tableau 19). Dans la situation future, elle dure 50 jours seulement et s'étend du 20 Octobre au 13 Novembre.

Method	Iteration	Iteration	Iteration	Iteration	Iteration	Iteration	Iteration
Proposed	1	2	3	4	5	6	7
Existing	1	2	3	4	5	6	7
Existing	1	2	3	4	5	6	7
Existing	1	2	3	4	5	6	7
Existing	1	2	3	4	5	6	7
Existing	1	2	3	4	5	6	7

Fig. 10: Comparison of the proposed method with the existing methods for the case of the system with 10 nodes and 10 links. The results are shown in the table below.

Tableau 19. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Bordj Bou Arreridj (cas de semis non prescrit).

	Phase végétative		Phase reproductive	
	Période 1	Période 2	Période	Période
	L1 : (D1-D2)	L2 : (D2-D3)	L3 : (D3-D4)	L4 : (D4-D5)
Situation actuelle	26 Nov.-28 Jan. 64 jours	28 Jan.-12 Mar. 43 jours	12 Mar.-12 Mai 61 jours	12Mai- 28 Jui. 47 jours
Situation future	20 Oct.-13 Nov. 25 jours	13 Nov.-9 Déc. 25 jours	9 Déc. -28 Fév. 82 jours	28 Fév.- 7 Mai 68 jours

Le raccourcissement calculé sur cette phase est de 57 jours et concerne plus son début (39 jours) que sa fin (18 jours).

La phase L1 qui dans le scénario actuel se réalise entre la fin de l'automne et le début de l'hiver, avance considérablement dans le scénario futur. Elle se réalise totalement en automne, et accumulera les degrés jours nécessaires à son accomplissement dans de meilleures conditions thermiques (Fig. 40). Le réchauffement futur de l'automne est plus important en début de saison qu'à la fin (+3.7 °C en Septembre et Octobre contre +2.5 °C en Novembre), et c'est en fait ce qui explique le raccourcissement considérable de la période. La phase L2, se situera entre la fin de l'automne et le début de l'hiver, période moins favorable thermiquement, d'où le raccourcissement moins important.

La durée de la phase reproductive dans le scénario actuel est de 108 jours et s'étend du 12 Mars au 28 Juin. Elle est plus longue de 41 jours dans le scénario futur (149 jours), couvrant la période du 9 Décembre au 7 Mai.

L'allongement de la phase reproductive à Bordj Bou Arreridj est le double de celui constaté à Alger, mais la contribution du début et de la fin de cette dernière dans cet allongement est la même.

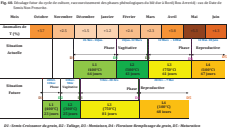


Fig. 10: Timeline of the project from the start of the first phase to the end of the last phase.

A Bordj Bou Arreridj, la période reproductive commence en début d’hiver dans la situation future au lieu du début de printemps dans la situation actuelle. Le décalage saisonnier de la phase et la baisse de température qui l’accompagne induisent un allongement du temps nécessaire à l’accumulation de la somme de température requise pour la réalisation de la phase. Le réchauffement climatique de la région ne permet pas de contrebalancer l’effet futur de précocité des différentes phases phénologiques.

Nos résultats confirment partiellement ceux trouvés par Ventrella et al. (2012) dans le sud de l’Italie. Utilisant 5 scénarios climatiques différents, ils montrent en effet que le raccourcissement de la phase végétative (semis-floraison) est considérable (supérieur à 30 jours), alors qu’il est insignifiant (de 3 à 4 jours) pour la phase reproductive (floraison-maturation).

3.1.2.2. Cas de semis prescrit

A Alger, la phase végétative se réalise entre le 1^{er} Novembre et le 23 Décembre dans la situation actuelle. Dans la situation future, elle s’achève 15 jours à l’avance, soit le 8 Décembre (Tableau 20). Cet avancement de la phase végétative se traduit par un raccourcissement, plus important à son début qu’à sa fin en raison des meilleures conditions thermiques (Fig. 41).

Tableau 20. Dates de réalisation et durées des phases végétative et reproductive à Alger (cas de date de semis prescrite).

	Phase végétative		Phase reproductive	
	Période 1 L1 :(D1-D2)	Période 2 L2 :(D2-D3)	Période 3 L3 :(D3-D4)	Période 4 L4 :(D4-D5)
Situation actuelle	1 ^{er} Nov–28 Nov 28 jours	28 Nov-23Déc 25 jours	23Déc-1 ^{er} Mars 68 jours	1 ^{er} Mars-1 ^{er} Mai 60 jours
Situation future	1 ^{er} Nov-18 Nov 18 jours	18Nov-8Déc 20 jours	8Déc-15Fév 64 jours	15Fév-11Avr 55 jours

Year	Phenotype	Population	Phenotype	Population	Phenotype	Population	Phenotype	Population
2000	Phenotype A	100	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0
2001	Phenotype A	80	Phenotype B	20	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0
2002	Phenotype A	60	Phenotype B	40	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0
2003	Phenotype A	40	Phenotype B	60	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0
2004	Phenotype A	20	Phenotype B	80	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0
2005	Phenotype A	10	Phenotype B	90	Phenotype C	0	Phenotype D	0
	Phenotype B	0	Phenotype C	0	Phenotype D	0	Phenotype E	0

Fig. 10. Evolution of the population of the different phenotypes of the *Yersinia enterocolitica* strains over time. The population of the different phenotypes of the *Yersinia enterocolitica* strains was determined by PCR analysis of the *Yersinia enterocolitica* strains isolated in 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, and 2005. The population of the different phenotypes of the *Yersinia enterocolitica* strains was determined by PCR analysis of the *Yersinia enterocolitica* strains isolated in 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, and 2005. The population of the different phenotypes of the *Yersinia enterocolitica* strains was determined by PCR analysis of the *Yersinia enterocolitica* strains isolated in 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, and 2005.

La phase reproductive s'étale sur la période 23 Décembre – 1^{er} Mai dans la situation actuelle et sur la période 8 Décembre – 11 Avril dans le scénario futur. Elle accuse un raccourcissement futur de 9 jours, équitablement réparti entre le début et la fin de la phase.

Les quelques degrés projetés par le réchauffement du climat futur seront atténués par le recule de la phase reproductive vers des périodes thermiquement encore plus défavorables.

A Bordj Bou Arreridj et à compter du 1^{er} Novembre, la phase végétative s'achève en moyenne le 6 Février dans le scénario actuel et le 6 Janvier dans le scénario futur (Tableau 21).

Un raccourcissement futur de la phase de 31 jours en découle. Ce dernier est plus concentré sur la période L1 (18 jours) que sur la L2 (13 jours). Les augmentations de températures futures sont plus importantes en début de phase végétative qu'en fin de phase (+2.5 °C en Novembre contre +1.5 °C en Décembre) : la croissance du végétal sera donc plus rapide durant la L1.

La période reproductive occupe la période 6 Février – 17 Juin dans la situation actuelle et du 6 Janvier – 17 Mai dans le scénario futur.

Tableau 21. Dates de réalisations et durées des phases végétative et reproductive à Bordj Bou Arreridj (cas de date de semis prescrite).

	Phase végétative		Phase reproductive	
	Période 1 L1 : (D1-D2)	Période 2 L2 : (D2-D3)	Période 3 L3 : (D3-D4)	Période 4 L4 : (D4-D5)
Situation actuelle	1 ^{er} Nov–18 Nov 46 jours	17 Déc-6Fév 51 jours	6Fév-23Avr 76jours	2Avr-17Juin 55 jours
Situation future	1 ^{er} Nov-28Nov 28jours	29Nov-6Janv 38 jours	6Jan-22Mars 75 jours	22Mars-17Mai 56 jours

Le raccourcissement moyen de la phase est donc nul. En effet, la L3 est raccourcie d'un jour contre un allongement aussi d'un jour de la L4. L'avancement de la phase reproductive due à la précocité de la phase végétative a induit le déroulement de la L3 dans des conditions thermiques plus fraîches. Cependant, la somme de température nécessaire à la réalisation de cette dernière (700 °C) est accumulée plus rapidement (raccourcissement de la période de 1 jour), grâce à l'augmentation future de la température.

Cela ne s'applique pas à la L4, du fait de sa somme de température plus importante (1000°C), et qui a même nécessité un prolongement d'un jour pour achever son accumulation (Fig. 42).

Dans ce deuxième cas de semis, les conclusions de Ventrella et al. (2012), expliquées antérieurement, sont complètement confirmées à Bordj Bou Arreridj, mais seulement partiellement à Alger. L'intensité des réponses des phases phénologiques des cultures aux changements climatiques est variable dans l'espace et dans le temps (Menzel et al., 2001 ; Wang et al., 2008). Nos résultats montrent qu'elle est fonction des caractéristiques du changement climatique futur et donc de la localisation de la zone d'étude, mais aussi du mode de semis.

3.1.3. Dates de récolte

La date de récolte, quant à elle, varie en fonction de la région et du choix de la méthode de semis (Tableau 22).

3.1.3.1. Cas du semis dynamique

Dans le scénario futur et lorsque la date de semis est dynamique, la date moyenne de récolte à Alger avance du 24 Mai au 27 Mars, soit de 58 jours par rapport à la situation actuelle. A Bordj Bou Arreridj, elle avance du 28 Juin au 7 Mai, soit de 52 jours. Cet avancement important est dû à la précocité de la date de semis déjà discutée ainsi qu'à l'augmentation des températures futures.

Tableau 22. Dates de récolte dans les situations actuelle et future, dans les deux régions d'étude.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	144±11 (24 Mai)	179±8 (28 Juin)	130±7 (10 Mai)	168±8 (17 Juin)
Situation future	86±23 (27 Mars)	127±16 (7 Mai)	106±6 (16 Avr.)	137±7 (17 Mai)

Ces dernières induisent une accélération du rythme de réalisation des différentes phases de développement du blé (Asseng et al., 2003 ; Wang et al., 2008 ; Ventrella et al., 2012) .

3.1.3.2. Cas de semis prescrit

Lorsque la date de semis est prescrite, la récolte avance à Alger de 24 jours entre la situation actuelle et le scénario futur, et se produit le 16 Avril au lieu du 10 Mai. A Bordj Bou Arreridj, elle avance du 17 Juin au 17 Mai, soit de 31 jours.

La précocité de la date de récolte dans le cas d'Alger est due aux raccourcissements des phases végétatives et reproductives déjà discutés. Dans le cas de Bordj Bou Arreridj, elle a pour origine le seul raccourcissement de la phase végétative qui est en effet de 31 jours. Comme dans cette situation la date de semis est fixée au 1er Novembre, ces raccourcissements ne peuvent avoir pour origine que les augmentations futures de température.

3.1.4 Longueur du cycle de culture

Avec une date de semis non prescrite, la longueur moyenne du cycle est actuellement de 188 à Alger et 214 à Bordj Bou Arreridj, elle devient 171 et 199 respectivement dans le scénario futur dans les deux zones d'étude. Le raccourcissement du cycle qui en découle est de 17 et 15 jours respectivement à Alger et Bordj Bou Arreridj. La longueur du cycle est encore plus réduite dans le cas de semis prescrit et devient 166 et 197 respectivement à Alger et à Bordj Bou Arreridj (Tableau 23).

Tableau 23. Raccourcissement du cycle de la culture de blé dur dans les situations futures à Alger et Bordj Bou Arreridj

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	188±7	214±25	190±7	228±8
Situation future	171±8	199±14	166±6	197±7

Dans les deux cas de semis et dans nos deux sites d'étude, un raccourcissement du cycle de la culture du blé dur dû à l'augmentation future des températures est confirmé.

Cependant le cycle le plus long correspond à la situation de semis dynamique à Bordj Bou Arreridj, ce qui se traduira obligatoirement par une meilleure accumulation de la matière sèche totale (TDM).

Nos résultats rejoignent ceux de Guereña et al. (2001), Giannakopoulos et al. (2009), Moriondo et al. (2011), Ventrella et al. (2012), indiquant que le réchauffement futur à travers le Bassin Méditerranéen raccourcit le cycle de croissance du blé dur.

3.2. Cas de l'interruption du cycle de culture par un stress hydrique

Comme expliqué précédemment, le modèle traite le cas de l'occurrence de sécheresses durant la phase de floraison, dont la caractérisation est détaillée dans le chapitre 3, section 3.5. Dans ce cas, il peut y avoir échec total du cycle (aucun rendement) ou accomplissement partiel du cycle avec production d'un rendement minimum. Dans ce qui suit, nous allons détailler d'abord l'effet que peut avoir le changement futur du climat sur l'évolution du cycle de la culture du blé dur

3.2.1. Echec total du cycle de culture

Les résultats relatifs à l'échec total et partiel du cycle dans les deux sites d'études sont mentionnés dans les Tableaux 24 et 25.

Tableau 24. Taux d'échec total du cycle de culture (%) dans les deux cas de semis et les deux types de climat, à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	0	34	0	17
Situation future	0	7	0	7

Ils indiquent que dans la région d'Alger les sécheresses, telles que décrites par le modèle, n'arrivent pas, que ce soit dans la situation actuelle ou future et quel que soit le protocole de semis (Tableau 24, 25). En effet, dans cette région subhumide à sols profonds, les conditions hydriques sont favorables pour la croissance de la culture et persisteront dans le futur.

A Bordj Bou Arreridj, les conditions présentes sont moins favorables, mais s'améliorent dans le futur (Tableau 24). Lorsque la date de semis est non prescrite, l'échec total du cycle, significatif dans le climat présent (34 %), diminue considérablement dans le futur (7 %).

Dans le cas de date de semis prescrite, l'échec de la culture est de 17 % dans la situation actuelle et régresse à 7 % dans le futur. La règle de décision utilisée pour déterminer la date de semis a un fort impact sur l'échec du cycle de culture dans la région, chose confirmée en Tunisie (Lhomme et al., 2009). Les précipitations estivales et automnales futures sont plus généreuses dans le scénario futur offrant ainsi de meilleures conditions hydriques capables d'améliorer les possibilités de semis précoce et donc de récolte précoce. Ceci améliore les chances de la culture d'échapper aux sécheresses de fin de saison censées s'accroître dans le contexte du changement du climat.

3.2.2. Echec partiel du cycle de culture

Dans le cas de date de semis non prescrite, le pourcentage d'échec partiel du cycle est de 10 % aussi bien dans le climat actuel que futur à Bordj Bou Arreridj. Ce taux est de 20 % dans la situation de date de semis prescrite, pour le présent comme pour le futur (Tableau 25).

Tableau 25. Taux d'échec partiel du cycle de culture (%) dans les deux cas de semis et les deux types de climat, à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	0	10	0	20
Situation future	0	10	0	20

Dans le premier cas de semis, les possibilités de précocité du semis sont importantes, augmentant ainsi la probabilité pour que le végétal termine son cycle tôt, avant l'occurrence de sécheresses telles que décrites par le modèle. Dans le deuxième cas de semis, cette probabilité est minimisée du fait de la tardivité du semis.

Cependant, les chiffres ne changent pas entre climats actuel et futur. Dans les deux cas de semis, un déplacement du cycle de culture vers l'automne est constaté. L'effet des sécheresses printanières, qui seront plus intenses et plus longues (IPCC, 2007), est donc atténué non seulement par le raccourcissement du cycle de culture, mais aussi par son décalage vers l'automne, saison plus généreuse sur le plan hydrique dans le futur.

4. Impact du changement du climat sur les caractéristiques hydriques

Les statuts hydriques du sol et de la plante sont directement liés aux caractéristiques de la pluviométrie et de l'évapotranspiration de référence régnant le long du cycle de la culture tant dans le climat actuel que dans le contexte du changement climatique futur. Les figures 43, 44, 45 et 46, indiquent clairement ces liens et donc constituent un support pour la compréhension des explications qui vont suivre.

4.1. L'évapotranspiration réelle cumulée moyenne sur le cycle de culture (ETCM)

L'évapotranspiration de la culture cumulée le long de son cycle est plus importante à Alger qu'à Bordj Bou Arreridj dans les deux situations présente et future. Les conditions hydriques sont meilleures à Alger qu'à Bordj Bou Arreridj, même dans le contexte du changement climatique.

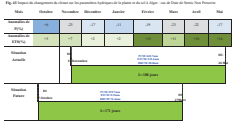


Figure 10: Diagram of the proposed system architecture.



Figure 1: A schematic diagram of the experimental setup for the study of the effects of the different components of the diet on the growth and survival of the larvae of the European spruce sawfly.

A l'exception du cas d'un semis dynamique dans la région de Bordj Bou Arreridj, les valeurs mentionnées dans le Tableau 26 montre que l'ETCM tend à diminuer dans le climat futur. Ceci est probablement dû au raccourcissement du cycle de culture et à son déplacement dans le temps, vers des périodes moins favorables sur le plan hydrique.

A Alger, la décroissance relative de l'ETCM entre situation future et actuelle est de -37 % et -27 % respectivement dans le cas de date de semis non prescrite et prescrite au 1^{er} Novembre. En effet, dans le climat futur, le cycle de culture est avancé sur la période 7 Octobre- 27 Mars dans le cas de date de semis dynamique, et se réalise du 1^{er} Novembre au 16 Avril dans le cas de semis prescrit (Fig. 43 ; 44).

Même si le raccourcissement du cycle est plus important dans le deuxième cas de semis, son retard de réalisation accuse un cumul supplémentaire de l'ETCM, car les augmentations futures de cette dernière sont plutôt importantes vers la fin de la saison de culture.

A Bordj Bou Arreridj, le cas de semis non prescrit apparaît plus avantageux par rapport à l'ETCM avec une augmentation future de cette dernière de +6 % (Fig. 45 ; Fig. 46)

Dans ce cas de semis, le cycle de culture est plus précoce et plus long. L'ETCM correspondante est favorisée, d'une part par les augmentations futures de la pluviométrie prévues en début de saison, et d'autre part par l'augmentation de l'ET0, plus importante vers la fin de la saison de culture dans le climat futur.

Tableau 26. Evapotranspiration cumulée sur le cycle de culture (mm) dans les deux cas de semis, à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	333.4±19.3	177.2±29.6	305.6±20.8	255.5±30.4
Situation future	211±22.9	187.8±28	223.3±22.6	172.3±28.7
Ecart (%)	-37	+6	-27	-32

Year	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Population (in thousands)	2,100	2,200	2,300	2,400	2,500	2,600	2,700	2,800	2,900	3,000	3,100
Population density (inhabitants/km ²)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Urbanization rate (%)	80	85	90	95	98	100	100	100	100	100	100
Population growth rate (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Population density growth rate (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Urbanization rate growth rate (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Population density growth rate (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Figure 10: Evolution of the population of the city of Paris from 1960 to 2010. Source: INSEE.

Fig. 10 - Diagramme de Gantt des tâches de développement logiciel de l'application de gestion des ventes de la société ABC. Les tâches sont classées par ordre de dépendance.

Tâche	Début	Fin	Prédecesseurs
T1	01/01/2023	05/01/2023	
T2	06/01/2023	10/01/2023	T1
T3	06/01/2023	15/01/2023	T1
T4	11/01/2023	15/01/2023	T2, T3
T5	16/01/2023	20/01/2023	T4
T6	16/01/2023	25/01/2023	T4
T7	26/01/2023	30/01/2023	T5, T6
T8	31/01/2023	05/02/2023	T7, T8

4.2. La pluie cumulée (PC) sur le cycle de culture

A l'exception de la région de Bordj Bou Arreridj dans le cas de semis est dynamique, la pluie cumulée sur le cycle de culture diminue dans le climat futur (Tableau 27).

A Alger le taux de diminution est de -18% lorsque la date de semis est dynamique, et atteint -25% dans le cas de date de semis prescrite (Fig. 43 ; 44).

A Bordj Bou Arreridj dans la situation future, on assiste à une augmentation de +7 % de la pluie cumulée lorsque la date de semis est dynamique (Fig. 45), contre une diminution de -34 %, dans le cas où la date de semis est prescrite au 1^{er} Novembre (Fig. 45 ; 46).

Les taux de diminution relatifs au cas d'une date d'un semis prescrit sont les plus importants. Cette situation de semis dans les scénarios futurs est très désavantageuse pour la plante sur le plan hydrique. En effet, la tardivité du semis prive la plante des seules augmentations de pluies prévues en automne dans le contexte du changement climatique futur.

Une date de semis dynamique, et donc la possibilité de semis précoce, offre donc une meilleure probabilité de tirer profit des changements climatiques futurs. En effet dans cette situation et en comparaison avec l'autre cas de semis, le taux de diminution est moins important à Alger (-18 %), et même positif à Bordj Bou Arreridj.

Tableau 27. Pluie cumulée sur le cycle (mm) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	440.7±68.2	167.6±71.2	454±70.9	249.3±70.5
Situation future	359.5±70.6	180.1±68.1	339.5±69.6	163.5±73.1
Ecart (%)	-18	+7	-25	-34

Dans cette dernière région, la distribution pluviométrique sur le cycle de culture dans le futur est beaucoup plus favorable qu'à Alger (Voir Chapitre 4, section 2.2.2).

4.3. Le déficit hydrique cumulé moyen sur le cycle de culture (DHCM)

A Alger, le confort hydrique de la culture, assez bon dans la situation présente, décroît fortement dans le scénario futur, quel que soit le protocole de semis choisi (Tableau 28). En effet, le climat futur, en comparaison avec le climat présent, est caractérisé par une pluviométrie plus faible (particulièrement celle cumulée sur le cycle de la culture), et par une évapotranspiration de référence (et donc celle de la culture) plus forte (Fig. 43 ; 44).

A Bordj Bou Arreridj, le climat présent est caractérisé par des valeurs élevées du DHC, particulièrement dans le cas de semis prescrit. Mais son augmentation dans le scénario futur est légère en comparaison avec la région d'Alger.

Les changements de la pluviométrie dans le futur sont plus avantageux pour la culture du blé dur à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger. Exceptionnellement, la situation de date de semis dynamique permet d'améliorer le bilan hydrique de la culture dans la situation future, d'un taux de 6 %. Cela n'est autre que le résultat du déplacement du cycle de culture vers l'automne, saison caractérisée dans le climat futur de la région par une augmentation importante de la pluviométrie (Fig. 45 ; 46).

Tableau 28. Déficit hydrique moyen cumulé sur le cycle de culture dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	28.8±6	260.4±51.3	28.2±7.6	273.4±65.2
Situation future	76.4±9.3	244.8±54.1	72±10.7	288.8±58.7
Ecart (%)	+165	-6	+158	+6

4.4. L'indice de stress hydrique moyen (ISH)

A Alger, l'indice de stress hydrique est faible dans le scénario actuel dans les deux situations de semis, mais augmente considérablement dans le futur, confirmant que les conditions hydriques deviennent plus sévères (Tableau 29). Cela est principalement dû à la baisse significative des précipitations dans le futur au cours du cycle de culture (Fig. 43 ; 44).

A Bordj Bou Arreridj, l'ISH dans les conditions climatiques présentes est assez élevé dans les deux protocoles de semis en témoignage de l'aridité de la région. Dans le climat futur, il augmente de +23% dans la situation de semis prescrit, mais diminue de -10% dans le cas de semis démontrant que le semis précoce est une bonne stratégie pour la gestion de la sécheresse dans la région dans le contexte du changement climatique (Fig. 45 ; 46).

5. Impact du changement climatique sur le rendement

L'impact du changement climatique sur l'accumulation de la biomasse et sur le rendement est plutôt lié aux changements futurs dans la quantité de rayonnement solaire reçu. Les figures 47, 48, 49 et 50, sont conçues afin d'illustrer ce lien et de renforcer les explications qui suivent.

Tableau 29. Valeurs de l'indice de stress hydrique sur le cycle de culture dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	8±5	50±18	9±4	52±11
Situation future	26±15	45±15	25±14	64±10
Ecart (%)	+225	-10	+177	+23

5.1. Matière sèche totale accumulée sur le cycle de culture (TDM)

La matière sèche totale accumulée au cours du cycle de culture est plus importante à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger, quels que soient la situation de semis et le type de climat. Ceci en raison de la meilleure insolation reçue dans la région.

Il y aura cependant une diminution de la valeur de la TDM dans le scénario futur (Tableau 30), due principalement au raccourcissement du cycle de culture sous l'effet du changement du climat, d'où la diminution de la quantité de rayonnement solaire interceptée par la plante.

Mearns et al. (1997) et Van Oijen et Ewert (1999) rapportent en effet que l'augmentation des températures tend à réduire la longueur du cycle de croissance du blé, induisant une plus faible interception de la radiation avec en conséquence une diminution de l'absorption du rayonnement et donc du taux de matière sèche accumulée sur le cycle. Tubiello et al. (2000), Ferrise et al. (2011) et Ventrella et al. (2012) ajoutent que la conséquence du raccourcissement du cycle sur l'accumulation de biomasse et sur le rendement en grain, en milieu méditerranéen, ne sera négative qu'à partir d'un réchauffement de 2 °C. Cette dernière condition est, en effet, vérifiée dans les deux régions de notre étude.

Tableau 30. Matière sèche totale accumulée sur le cycle de culture (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	8.1± 0.7	11.2± 0.8	7.6±0.7	11.3±1.1
Situation future	6.2± 0.9	9.7±0.9	6.8±0.6	10.2±1
Ecart (%)	-23	-13	-10	-10

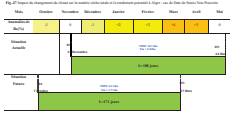


Figure 10: Diagramme de répartition de l'énergie sur les différents modes de transmission pour le cas de l'acier et du béton.

Fig. 10: Diagram illustrating the layout of a page with a header, a main content area, and a footer. The header contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1". The main content area contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1". The footer contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1".

Area	Header	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7	Section 8	Section 9	Section 10	Section 11	Section 12	Section 13	Section 14	Section 15	Section 16	Section 17	Section 18	Section 19	Section 20	Section 21	Section 22	Section 23	Section 24	Section 25	Section 26	Section 27	Section 28	Section 29	Section 30	Section 31	Section 32	Section 33	Section 34	Section 35	Section 36	Section 37	Section 38	Section 39	Section 40	Section 41	Section 42	Section 43	Section 44	Section 45	Section 46	Section 47	Section 48	Section 49	Section 50	Section 51	Section 52	Section 53	Section 54	Section 55	Section 56	Section 57	Section 58	Section 59	Section 60	Section 61	Section 62	Section 63	Section 64	Section 65	Section 66	Section 67	Section 68	Section 69	Section 70	Section 71	Section 72	Section 73	Section 74	Section 75	Section 76	Section 77	Section 78	Section 79	Section 80	Section 81	Section 82	Section 83	Section 84	Section 85	Section 86	Section 87	Section 88	Section 89	Section 90	Section 91	Section 92	Section 93	Section 94	Section 95	Section 96	Section 97	Section 98	Section 99	Section 100
Header	Page 1 of 1																								Page 1 of 1																																																																												
Main Content	Page 1 of 1																								Page 1 of 1																																																																												
Footer	Page 1 of 1																								Page 1 of 1																																																																												

Figure 10: Diagram illustrating the layout of a page with a header, a main content area, and a footer. The header contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1". The main content area contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1". The footer contains the text "Page 1 of 1" and "Page 1 of 1".

La décroissance de la TDM est plus prononcée dans le cas de semis dynamique, particulièrement à Alger (-23 % contre -13 % à Bordj Bou Arreridj). En effet, dans ce cas, le cycle se déplace vers le mois d'Octobre et se termine plus tôt au printemps. Ce décalage dans le temps est défavorable à l'accumulation de la TDM. D'une part, car le rayonnement solaire subit une décroissance maximale en Octobre dans le climat futur, et de l'autre, parce que la précocité de la récolte (particulièrement dans le cas d'Alger), privera partiellement la culture des augmentations futures du rayonnement solaire que connaîtra le printemps (+3 % en Avril). A l'inverse du semis dynamique, le semis prescrit accroît la probabilité de faire profiter la plante des augmentations futures du rayonnement solaire (Fig.47-50)

5. 2. Le rendement potentiel ou maximum (Ym)

Les valeurs de Ym sont plus faibles à Alger qu'à Bordj Bou Arreridj, cette dernière dispose en effet de meilleures potentialités en matière de céréaliculture.

Le rendement maximum décroît systématiquement dans le climat futur quel que soit le protocole de semis choisi (Tableau 31). La diminution est cependant plus importante dans la situation de semis dynamique, particulièrement à Alger (Fig. 47-50).

Tableau 31. Rendement potentiel (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	2.2±0.2	3.0±0.2	2.0±0.2	3.1±0.3
Situation future	1.7±0.3	2.6±0.2	1.8±0.2	2.8±0.3
Ecart (%)	-23	-13	-10	-10



Figure 10: Diagramme de Gantt de l'impact de la mise en œuvre de la stratégie de gestion des déchets solides

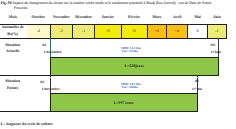


Fig. 10 Diagramme de Gantt de l'opération de fabrication de la pièce en acier inoxydable (acier inoxydable) en utilisant le logiciel de planification de ressources (MSP) de Microsoft Project.

Comme le rendement potentiel dans notre modélisation est calculé utilisant la TDM et l'indice de récolte (HI), pris ici égal à 0.27, la décroissance future du rendement potentiel a pour seule origine la diminution de la TDM. Il apparaît donc que le passage d'un taux de CO₂ de l'air de 370 ppm à 700 ppm, ainsi que les faibles augmentations du rayonnement solaire caractéristiques du climat futur, sont incapables d'atténuer les effets négatifs du raccourcissement du cycle sur l'accumulation de la matière sèche et le rendement en grain.

5. 3. Le rendement réel ou actuel (Ya)

Contrairement au rendement potentiel, le rendement réel est plus important à Alger qu'à Bordj Bou Arreridj. Cette dernière zone est bien connue pour l'occurrence de périodes sèches, qui conditionnent souvent le niveau de la récolte.

L'effet négatif du climat futur sur le rendement réel est très significatif à Alger (Tableau 32). La diminution relative de Ya est de -22 % lorsque la date de semis est prescrite et -40 % dans le cas du semis dynamique. Cela est dû à la fois à la forte diminution de Ym et à la grande augmentation de l'ISH.

A Bordj Bou Arreridj, la variation relative de Ya entre situation future et actuelle est de -36 % dans le cas de semis prescrit et nul lorsque le semis est dynamique. Contrairement à Alger, le semis tardif ne permet pas au cycle de croissance d'échapper aux périodes de sécheresse supposées survenir dans le climat futur. Le semis dynamique, par contre, offre de meilleures opportunités par la précocité du semis, en raison des précipitations automnales importantes attendues dans le climat futur.

Tableau 32. Rendement réel (t/ha) dans les deux cas de semis à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Date de semis non prescrite		Date de semis prescrite	
	Alger	Bordj Bou Arreridj	Alger	Bordj Bou Arreridj
Situation actuelle	2.0±0.2	1.4±0.4	1.8±0.2	1.4±0.4
Situation future	1.2±0.4	1.4±0.4	1.4±0.4	0.9±0.4
Ecart (%)	-40	-0	-22	-36

La récolte se réalise plus tôt, permettant d'éviter ainsi les sécheresses de fin de cycle, le problème le plus redoutable pour la céréaliculture dans la région. L'accumulation de la matière sèche peut se faire dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et l'augmentation du niveau de CO₂ attendu dans le futur est suffisant pour garder le rendement à son niveau actuel.

6. Conclusion

La culture de blé dur, de par son développement et son rendement, répond différemment dans nos deux zones d'études aux changements climatiques futurs. La région d'Alger, vu sa situation agroclimatique, est non concernée par les échecs de semis et de cycle. Bordj Bou Arreridj, à l'inverse, manifeste une considérable amélioration concernant ces paramètres, particulièrement dans le cas de semis dynamique. Les augmentations des précipitations d'automne attendues dans le futur semblent être très bénéfiques pour la région.

Le cycle de culture est indiqué subir un raccourcissement dans le climat futur. Le positionnement de ce raccourcissement par rapport aux phases phénologiques est fonction des caractéristiques climatiques futures de la région, mais aussi du protocole de semis choisi. Quelle que soit la méthode de semis, la phase végétative, particulièrement son début, est sujette au raccourcissement. La phase reproductive subit plutôt un allongement dans le cas de semis dynamique, et ne semble pas varier significativement lorsque le semis est prescrit. Le déplacement du cycle ainsi que son raccourcissement futur sont accompagnés d'un changement considérable dans les conditions thermiques, chose qui influe considérablement sur la durée de réalisation des différentes phases phénologiques et donc sur la matière sèche totale (TDM) accumulée. Ils influent éventuellement sur le statut hydrique de la plante et du sol, en raison du changement projeté dans le régime pluviométrique. Ce dernier étant plus sévère dans le futur, nous assistons à une réduction des rendements. Exceptionnellement à Bordj Bou Arreridj et en raison des fortes augmentations de pluies projetées en automne, la situation de semis dynamique permet la précocité du semis et de la récolte et l'évitement des sécheresses de fin de saison. L'accumulation de la TDM se fait dans de bonnes conditions hydriques et permet de garder le niveau actuel des rendements dans la région.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse avait pour objectif principal d'étudier le changement climatique en Algérie ainsi que son impact sur le développement et le rendement de la culture la plus stratégique du pays, le blé dur. En effet, la question du changement climatique et de ses impacts sur les cultures préoccupe une grande partie de la communauté scientifique, et la documentation sur ce sujet a concerné une grande partie des régions du globe terrestre, mais pas l'Algérie jusqu'à maintenant. Le principal défi stratégique que nous espérons avoir relevé est d'initier la recherche dans ce domaine et de proposer une première étude concernant l'Algérie. A travers ce travail, nous apportons des informations permettant de compléter l'information manquante à l'échelle de la zone sud du bassin méditerranéen, région classée parmi les plus vulnérables du globe dans le contexte du changement climatique. La démarche méthodologique employée dans cette étude a permis d'élaborer différents résultats originaux que nous résumons dans ce qui suit.

Le premier chapitre rappelle l'ensemble des hypothèses concernant l'origine du changement climatique et ses conséquences tant observées que futures, de l'échelle du globe à celui de la région, représenté ici par la zone Sud Méditerranéenne et Nord Africaine. L'information conduit aux conclusions suivantes : Les changements climatiques futurs peuvent être très différents d'une région à une autre et le degré élevé d'incertitude dans les projections climatiques rend difficile la modélisation des impacts dans de nombreux domaines, produisant des résultats contradictoires, d'où l'intérêt et la nécessité de mener un maximum possible d'études régionales. Parmi le nombre élevé d'études sur le changement climatique, seules quelques études récentes concernent la zone Nord Africaine. L'Algérie, le plus grand pays de cette zone, n'apparaît pas dans la masse d'études réalisée sur cette thématique. La disponibilité de données climatiques observées est très limitée et insuffisante pour permettre une estimation précise et claire des tendances climatiques .

Le deuxième chapitre consiste en une revue de la littérature traitant de l'impact du changement climatique sur les cultures. L'approche choisie s'inscrit dans le même état d'esprit que dans le premier chapitre, c'est-à-dire comprendre l'évolution des hypothèses avancées

dans la littérature concernant la modélisation des cultures et son utilisation dans les études d'impact. Les principales conclusions de ce chapitre sont : Le choix du type de modèle de culture doit être fait en fonction des objectifs assignés et le processus de simulation doit être adapté aux caractéristiques du système agricole étudié. Cependant, la prise en considération de la disponibilité des données d'entrée constitue souvent un facteur déterminant dans ce choix. Les résultats de recherche sur l'effet du changement climatique sur la culture de blé dur montrent une grande diversité. L'impact varie selon les caractéristiques du changement climatique attendu, lui-même fonction de la situation géographique de la zone d'étude, d'où l'importance de la présente étude.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé l'ensemble des matériels et méthodes employés dans cette thèse. Malgré le manque de disponibilité de données climatiques, nous avons réussi à construire une base de données dans deux régions représentatives des aires de productions céréalières en Algérie. Particulièrement à la Station Météorologique Bordj Bou Arreridj, les fichiers climatiques ne sont disponibles qu'en didactique et par conséquent nous étions contraints de les transcrire à la main puis de les transformer en version électronique, chose assez coûteuse en matière de temps.

Le choix du modèle climatique (ARPEGE) est basé sur la résolution spatiale (50 x 50 km) et le choix du scénario (A1B) est fondé sur la gravité des changements climatiques futurs liée au développement économique, le scénario A1B correspondant à une croissance économique moyenne. Pour la simulation de la culture, notre choix, limité par la disponibilité des données d'entrée s'est orienté vers la modélisation agrométéorologique. Le modèle choisi, par son approche simple et son nombre de données d'entrée limité, est bien adapté à nos objectifs et au cadre spatial de notre étude.

Le chapitre 4 est consacré au test de performance du modèle de culture et à sa validation. Cette étape est originale et importante, car elle permet d'estimer la précision du modèle et conditionne donc son utilisation future. Les résultats montrent un très bon ajustement entre rendements observés et simulés. La meilleure performance du modèle pour la région de Bordj Bou Arreridj est probablement due à la prise en considération d'un HI (Indice de Récolte) de 0.27, valeur déterminée sur quelques variétés locales de blé dur cultivées dans la région des hautes plaines de l'est Algérien. Le potentiel productif de ces variétés est plus faible en comparaison avec celles introduites dans la région d'Alger (Waha and Vitron).

Dans le cinquième chapitre, les données générées par le modèle ARPEGE-CLIMAT ont été appliquées au modèle de culture et ont conduit aux résultats suivants :

L'évolution du climat récent observé durant les périodes 1978-2007 et 1980-2009, respectivement à Alger et à Bordj Bou Arreridj montre une augmentation de la température moyenne annuelle de 0.9 °C à Alger et de 1.3 °C à Bordj Bou Arreridj, réchauffement significativement au-dessus des normes globales (0.74 ± 0.18 °C). Les précipitations annuelle ont par contre diminué de 2.8 % à Alger et augmenté de 4.3 % à Bordj Bou Arreridj indiquant une augmentation de l'irrégularité des précipitations dans le Nord de l'Algérie.

Le modèle ARPEGE-CLIMAT simule de manière satisfaisante les moyennes annuelles et mensuelles interannuelles de l'ensemble des paramètres climatiques à l'exception des précipitations qui sont moins bien reproduites du fait de l'instabilité de leur structure dans l'espace et dans le temps. Le réchauffement moyen du globe indiqué par l'IPCC (2007) vers la fin du 21^{ème} siècle selon le scénario A1B (+2.8 °C) est déjà atteint à Alger, et est dépassé de 0.5 °C à Bordj Bou Arreridj. Dans les deux régions d'étude, le réchauffement est minimum en hiver et maximum en été. A Bordj Bou Arreridj, le printemps est, après l'été, une saison particulièrement chaude dans le climat futur.

A l'inverse des températures, la pluie moyenne annuelle future diminue dans les deux sites d'étude et la distribution mensuelle des précipitations subit une variation considérable. A Alger, la précipitation moyenne annuelle décroît de -18 % dans le scénario futur et à l'exception d'une augmentation de + 6 % en Octobre, les précipitations mensuelles interannuelles diminuent tout au long de l'année. La décroissance de la pluie moyenne annuelle est moins faible à Bordj Bou Arreridj (-8 %), car il y a une augmentation importante des précipitations entre Juin et Octobre allant jusqu'à +54 % en Juillet. Ainsi, l'été qui apparaît dans le scénario futur encore plus sec à Alger, semble devenir plus humide à Bordj Bou Arreridj. Dans les deux sites d'étude, la décroissance des précipitations touche sensiblement l'automne mais très significativement le printemps qui semble devenir la saison la plus sèche durant le cycle de la culture du blé dur.

Le climat futur dans nos deux sites d'étude est caractérisé par une augmentation systématique de l'évapotranspiration de référence. Le rayonnement solaire augmente sensiblement et l'humidité relative moyenne de l'air diminue globalement au cours de l'année. La vitesse moyenne du vent quant à elle augmente globalement à Alger. A Bordj Bou Arreridj, elle diminue en moyenne, à l'exception des deux derniers mois du printemps où elle augmente considérablement, annonçant que la fréquence d'occurrence des siroccos sera plus élevée dans le climat futur.

Dans le dernier chapitre, nous exposons et discutons les résultats concernant l'impact du changement climatique sur le développement, les paramètres hydriques et le rendement de la culture du blé dur. Les principaux résultats sont les suivants :

La région d'Alger, du fait de son climat, est insensible à l'échec du semis et à celui de la culture tant dans le climat actuel que futur. A Bordj Bou Arreridj, du fait des conditions hydriques projetées plus favorables, le taux d'échec du semis et celui relatif à l'échec total du cycle, tous deux élevés dans les conditions présentes, s'améliorent dans le futur. Le taux d'échec partiel de la culture dans la région est plutôt lié au protocole de semis qu'à la situation de climat.

Le changement climatique futur influe aussi bien sur les dates de réalisation des différentes phases phénologiques que sur leur durée. Dans le cas de semis dynamique, le semis et la récolte dans les deux zones d'étude sont plus précoces, ce qui a pour résultat un raccourcissement du cycle de 16 jours en moyenne. Ce raccourcissement ne concerne que la période végétative (un raccourcissement moyen de 47 jours) et à l'inverse, la période reproductive s'allonge (de 31 jours en moyenne) dans le climat futur. Le raccourcissement de la phase végétative et l'allongement de la phase reproductive sont plus importants à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger. Dans le cas de semis prescrit, la récolte est plus tardive et le raccourcissement du cycle est plus important en comparaison avec le semis dynamique, particulièrement à Bordj Bou Arreridj (24 jours à Alger contre 31 jours à Bordj Bou Arreridj). A Bordj Bou Arreridj, le raccourcissement du cycle a pour origine la seule compression de la phase végétative. A Alger, la phase reproductive contribue dans le raccourcissement du cycle mais de manière non significative.

L'impact du changement climatique futur est globalement négatif sur l'ensemble des paramètres hydriques du sol et de la plante. Dans la situation présente l'évapotranspiration cumulée moyenne de la culture (ETCM) diminue globalement, mis à part son augmentation de + 7 % dans le cas de semis dynamique à Bordj Bou Arreridj. Le déficit hydrique cultural DHC et l'indice de stress hydrique ISH sont tous deux plus importants à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger, mais augmentent plus significativement à Alger qu'à Bordj Bou Arreridj dans le climat futur. Exceptionnellement, la situation de semis dynamique à Bordj Bou Arreridj permet d'améliorer le bilan hydrique de la culture d'un taux de +6 %, à l'origine de l'élévation déjà indiquée de l'ETCM

La matière sèche totale accumulée sur le cycle de culture (TDM) et le rendement potentiel (Ym) sont tous deux plus importants à Bordj Bou Arreridj qu'à Alger, quelle que soit la situation de semis et le type de climat. Ceci est dû à la meilleure insolation reçue dans la

région, justifiant son classement parmi les zones potentielles de production céréalière en Algérie. Les deux paramètres diminuent dans le contexte du changement climatique futur particulièrement dans le cas de semis dynamique dans les deux zones d'étude. Il apparaît donc que le passage du taux de CO₂ de l'air de 370 ppm à 700 ppm, ainsi que les faibles augmentations du rayonnement solaire caractéristiques du climat futur, sont incapables d'atténuer les effets négatifs du décalage et du raccourcissement du cycle sur l'accumulation de la matière sèche et le rendement en grain. L'effet du climat est significativement négatif sur le rendement réel dans les deux zones d'études. Exceptionnellement, le semis dynamique à Bordj Bou Arreridj présente de meilleures opportunités hydriques dans le futur induisant une récolte plus précoce permettant donc d'éviter les sécheresses de fin de cycle. L'accumulation de la matière sèche peut se faire dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et l'augmentation du niveau de CO₂ attendu dans le futur est suffisant pour garder le rendement à son niveau actuel.

PERSPECTIVES

Utilisant les projections du modèle climatique ARPEGE de METEO France, sous le scénario AIB, les zones Centre et Est du Nord de l'Algérie, représentées ici respectivement par Alger et Bordj Bou Arreridj, apparaissent être potentiellement vulnérables aux changements climatiques futurs. Dans le climat futur, la région d'Alger montre un faible potentiel pour la culture des céréales. A l'inverse, Bordj Bou Arreridj semble être une zone plus prometteuse, où le semis précoce représente une stratégie clé capable non seulement de faire profiter la culture des augmentations prévues dans les pluies d'automne, mais aussi de lui faire éviter les sécheresses de fin de saison, plus longues et sévères dans le contexte du changement climatique.

En l'absence de tout autre résultat sur la question des changements climatiques et ses impacts sur les cultures en Algérie, notre étude reste préliminaire et la réalisation d'autres recherches dans la même thématique relève de la première nécessité afin de mener à maturité le projet que nous avons initié.

Les prochaines études devraient se focaliser d'abord sur l'approfondissement de nos connaissances sur le changement du climat en Algérie. Les tendances climatiques dans les zones Sud Méditerranéenne et Nord Africaine peuvent différer et manquent de clarté (IPCC, 2013). Il conviendrait de commencer par revoir la présente étude à travers d'autres scénarios et d'autres modèles climatiques, et de compléter le présent travail par l'étude de l'évolution futur des extrêmes climatiques. L'Algérie est bien connue pour la présence d'un gradient thermique croissant et de précipitations décroissant en allant de l'Est vers l'Ouest (Bouaoune and Dahmani- Megrouche, 2010), et par une irrégularité spatio-temporelle générale de la pluviométrie (Hamlouli-Moulai et al., 2013). Il serait nécessaire ainsi de collecter une information aussi complète et aussi étendue que possible, concernant le climat et son évolution dans la région, chose qui dépend essentiellement de la disponibilité des données climatiques observées.

Le modèle de culture testé dans la présente étude a montré une moins bonne précision à Alger en raison de l'indice de récolte (HI) utilisé. Il serait intéressant d'améliorer la performance du

modèle en matière de simulation des rendements à travers la détermination du HI pour toutes les variétés de blé dur cultivées en Algérie. L'utilisation de variétés précoces étant l'une des principales clés d'adaptation de la céréaliculture dans la zone Sud Méditerranéenne (Kapetanaki et Rosenzweig, 1996 ; El-Shaer et al., 1996 ; Rosenzweig et Tubiello, 1997), il serait opportun de prendre en considération ce paramètre dans le processus de simulation tel que c'est fait concernant la date de semis.

Nos deux régions d'études ne sont qu'un échantillon des zones de production céréalière en Algérie. L'importance socio-économique de cette culture rend indispensable la généralisation de l'étude aux autres zones céréalières, particulièrement à celles classées potentiellement productives. Il conviendrait aussi de réaliser des études similaires concernant d'autres cultures prioritaires pour le pays, tel que la pomme de terre, l'olivier, les agrumes et le palmier dattier. Cela permettra de construire progressivement une base de données concernant la réponse des cultures à la variation des paramètres climatiques, qui sera à son tour utilisée dans le développement de stratégies de gestion et d'adaptation des cultures dans le contexte du changement du climat.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acock B, Acock M (1991) Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. *Agro J* 83:56–61.
- Adams R, Hurd MO, Reilly J (1999) Agriculture and Global Climate Change: A Review of Impacts to U.S. Agricultural Resources. Pew Climate [PDF]. http://www.pewclimate.org/docUploads/lenv_agriculture.pdf
- Adams RM, Mc Carl BO, Duek D, et Glycer D (1988) "Implications of Global Climate Change for Agriculture". *Western J Agri Econ* 13(2): 348-356. ADAPTS/Climate-agri.pdf (accessed 12 December 2009).
- Addiscott T M (1983) Kinetics and temperature relationships in structured soil. *J Soil Sci* 28:554-563
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank A, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Ambenje P, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J of Geophysical Res* 111: D05109, DOI:10.1029/2005JD006290
- Ali Dib T, Monneveux P, Araus JL (1992) Adaptation à la sécheresse et notion d'idiotype chez le blé dur. II. Caractères physiologiques d'adaptation. *Agronomie* 12: 381-393
- Allen RG (1986) A Penman for all seasons. *J Irri Drain Eng* 112:348–368
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy
- Alpert P, Ben-Gai T, Baharad A, Benjamini Y, Yecutieli D, Colacino M, Diodato L, Ramis C, Homar V, Romero R, Michaelides S, Manes A (2002) The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Ecophy Res Letters* 29(11): 1536, DOI: 10.1029/2001GL013554

- Alpert P, Krichak SO, Shafir H, Haim D, Osetinsky I (2008) Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the Mediterranean. *Glob and Plan Change* 63: 163–170
- Altava-Ortiz V, Llasat M, Ferrari E, Atencia A, Sirangelo B (2011) Monthly rainfall changes in Central and Western Mediterranean basins, at the end of the 20th and beginning of the 21st centuries. *Int J Climatol* 31:1943–1958. DOI: 10.1002/joc.2204
- Amokrane A, Bouzerzour H, Benbelkacem A, Djeh A, Mahe A (2002) Etude comparative des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) d'origine algérienne, syrienne et européenne, sous climat méditerranéen. *Sciences et Technologies N.sp. D.*, 33-38.
- Anothai J, Patanothai A, Pannangpetch K, Jogloy S, Boote KJ, Hoogenboom G (2008a) Reduction in data collection for determination of cultivar coefficients for breeding applications. *Agric Syst* 96:195–206
- Anwara MR, O'Leary G, McNeil D, Hossain H, Nelson R (2007) Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Res* 104:139–147
- Araya A, Stroosnijder L (2011) Assessing risk and irrigation need in Northern Ethiopia. *Agric Forest Meteor* 151:425- 436
- Arnell NW, Livermore MJL, Kovats S, Levy PE, Nicholls R, Parry ML, Gaffin SR (2004) Climate and socio- economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines. *Glob Environ Change* 14: 3–20
- Aslyng H C, Hansen S (1982) Water balance and crop production simulation. Model WATCROS for local and regional application. The royal veterinary and agricultural university, Copenhagen, 200p.
- Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, Pinter P, Sayre K, J.W. Bowden, Owden SM (2004) Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res* 85:85-102
- Bahlouli F (2006) Etude de la contribution des assimilés de la tige à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux stress abiotiques sous climat méditerranéen. Thèse de Doctorat, INA, El-Harrach, Alger, 98 p.
- Baier W (1979) Note on the terminology of crop-weather models. *Agric Meteorol* 20: 137–145
- Baldy Ch (1974) Etude fréquentielle du climat, son influence sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. Doc CCCE, Paris, 152 p

- Baldy Ch (1986) Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecologia Méditerranéa* XII :73-88
- Baldy Ch (1992) Effet du climat sur la croissance et le stress hydrique des blé méditerranéens occidentaux In *Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne*. Ed INRA, Paris, 397
- Bannayan M, Sanjani S, Alizadeh A, Sadeghi Lotfabadi S, Mohamadian A (2010) Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field Crops Res* 118 (2) :105–114
- Barkhordarian A, von Storch H, Bhend J (2013) The expectation of future precipitation change over the Mediterranean region is different from what we observe. *Clim Dyn* 40(1-2) : 225-244. doi: 10.1007/s00382-012-1497-7
- Bates B, Kundzewicz Z, Wu S (2008) *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC secretariat, Geneva, 210 p
- Batts GR, Ellis RH, Morison JIL, Hadley P (1998) Canopy development and tillering of field-grown crops of two contrasting cultivars of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to CO₂ and temperature. *Ann Appl Biol* 133: 101-109
- Bazzaz FA (1990) The response of natural ecosystem to the rising global CO₂ levels. *Annu Rev Ecol Syst* 21:167–196
- Bender J, Hertstein U, Black CR (1999) Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide. *European Journal of Agronomy* 10(3-4) :185–195
- Beniston M (1997). Variation in snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years. Link to changes in large scale climatic forcing. *Climatic Change* 36: 281-300
- Bensalem M (1993) Etude comparative de l'adaptation à la sécheresse du blé, de l'orge et du triticale. *Les colloques INRA* 64: 275-297.
- Berger A, Gallée H, Fichet T, Marsiat I, Tricot C (1990a) Testing the astronomical theory with a coupled climate—ice-sheet model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 89 (1–2): 125-141
- Berger A, Gallée H, Fichet T, Marsiat I, Tricot C (1990b) Testing the astronomical theory with a coupled climate—ice-sheet model. *Global and Planetary Change*: 3 (1–2), 125-141. doi:10.1016/0921-8181(90)90059-L
- Berger A, Loutre MF (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10 (4):297-317. doi:10.1016/0277-3791(91)90033-Q

- Berger A (1995) Chapter 2 Modeling the response of the climate system to astronomical forcing, In: A. Henderson-sellers, Editor(s), World Survey of Climatology. Volume 16. Elsevier, pp 21-69
- Bindi M, Maracchi G, Miglietta F (1993) Effects of climate change on the ontomorphogenic development of winter wheat in Italy, in: Kenny G J, Harrison P A, Parry M L (eds) The effects of Climate Change on Agricultural and Horticultural Potential in Europe. Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford, England
- Blenkinsop S, Fowler HJ (2007) Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *J Hydrol* 342: 50–71. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.05.003
- Blum A (1996) Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regul* 20:135–148
- Bolte JP, Hulse DW, Gregory SV, Smith C (2006) Modeling biocomplexity -actors, landscapes and alternative futures. *Environ Model Softw* 22: 570–579. doi:10.1016/j.envsoft.2005.12.033
- Born K, Fink A, Paeth H (2008) Dry and wet periods in the northwestern Maghreb for present day and future climate conditions. *Meteorologische Zeitschrift* 17: 533–551. doi 10.1127/0941-2948/2008/0313
- Bouaoune D, Dahmani-Megrouche M (2010) Climatic data reconstitution of North Algeria: Application of neural network method correlation. *C R Geosci* 342: 815-822. doi: 10.1016/j.crte.2010.09.005
- Bouman BAM, van Keulen H, van Laar HH, Rabbinge R (1996) The School-of-de-Wit crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric Systems* 52 (2-3): 171–198. doi:10.1016/0308-521X(96)00011-X
- Bouzerzour H, Dekhili M (1995) Heritability's, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Fields Crops Res* 41: 173- 178
- Broecker W S (1975) Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?. *Science*: 189, 460–463
- Brunetti M, Maugeri M, Nanni T, Navarra A (2002) Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series, during the last century in Italy. *Int J Climato* 22: 543–558. DOI: 10.1002/joc.751

- Bryson RA (1970) Climatic Effects of Atmospheric Pollution. *Glob Effects Environmenta Pol*:130–138
- BSA (2007) Bulletin de statistique agricole- Inventaire statistique des terres agricoles. Ministère de l'agriculture, Série B, 1970-2007, 21p
- Burkart S, Manderscheid R, Weigel HJ (2004) Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *Eur J Agron* 21: 401–417. doi:10.1016/j.eja.2004.07.003
- Burroughs W J (2007) *Climate change a multidisciplinary approach*. Cambridge university (eds), Second Edition. UK, Cambridge, pp344
- Burroughs WJ (2001) *Climate Change: A Multidisciplinary Approach*; First Edition. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 298p
- Caesar J, Alexander L, Vose R (2006) Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: creation and analysis of a new gridded data set. *Journal of Geophysical Research* 111: 51-69. DOI:10.1029/2005JD006280
- Carlson RE, Todey DP, Taylor SE (1996) Midwestern corn yields and weather in relation to extremes of the southern oscillation. *J Prod Agric* 9:347–352
- Carter TR, La Rovere, EL, Leemans RN, Mearns LO, Nakkicenovic N, Pittock AB, Semenov SM, Skea J (2001) Developing and applying scenarios. In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [McCarthy JJ, Canziani, OF, Leary NA, Dokken DJ White KS (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp145–190
- Cayan D, Tyree M, Dettinger M, Hidalgo H, Das T, Maurer E, Bromirski P, Graham N, Flick R (2009) *Climate Change Scenarios and Sea Level Rise Estimates for the California 2008 Climate Change Scenarios Assessment*. California Energy Commission Report CEC-500-2009-014-D, Sacramento, California
- Centritto M, Lucas ME, Jarvis PG (2002) Gas exchange, biomass, whole-plant water-use efficiency and water uptake of peach (*Prunus persica*) seedlings in response to elevated carbon dioxide concentration and water availability. *Tree Physiol.* 22(10): 699–706
- Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Slingo JM (2005) Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields. *Agric For Met* 135:180–189. doi:10.1016/j.agrformet.2005.11.015

- Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Slingo JM, Grimes DIF (2004). Design and optimisation of a large-area processbased model for annual crops. *Agric Forest Meteorol* 124 (1–2): 99–120. doi:10.1016/j.agrformet.2004.01.002
- Chou C, Neelin JD, Chen CA, Tu JY (2008) Evaluating the ‘rich-get-richer’ mechanism in tropical precipitation change under global warming. *J of Climate* 22: 1982–2005
- Chourghal N (2003) Modélisation agrométéorologique du bilan hydrique par simulation de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle de la région d'Alger. Thèse de magister, INA, Alger, 229pp
- Cline W (2007) Global Warming and Agriculture–Impact Estimates by Country. Center for Glob Dev, Washington. 164 p.
- CNIS (2005) Agriculture algérienne. Les statistiques. <http://www.douanes.cnis.dz>
- CNIS (2011) Agriculture algérienne. Les statistiques. <http://www.douanes.cnis.dz>
- Cooper PJM, Gregory PJ, Tully D, Harris HC, Loomis RS (1987) Improving water use efficiency of annual crops in rainfed systems of West Asia and North Africa. *Exp Agric* 23:113-158
- Coquillard P, Hill D (1997) Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson publ, Paris, France, 273 p
- Croitoru Adina-Eliza & Iulian-Horia Holobaca & Catalin Lazar & Florin Moldovan & Alexandru Imbroane (2012). Air temperature trend and the impact on winter wheat phenology in Romania. 111:393-410
- Cubasch U, Waszkewitz G, Hegrerl G, Perlwitz J (1995). Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climate Change* 31: 273-304.
- Curry RB (1971) Dynamic simulation of plant growth I. Development of a model. *Trans ASAE* 14 (5): 946–959
- Curry RB, Chen LH (1971) Dynamic simulation of plant growth II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthesis. *Trans ASAE* 14 (6): 1170–1175
- De Luis M, Ravent'os J, Gonz'alez-Hidalgo JC, S'anchez JR, Cortina J (2000) Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *Int J of Climato* 20: 1451–1469
- De Wit CT, Goudriaan J (1974) Simulation of ecological processes. Simulation monographs. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc). Wageningen, Netherlands

- Debaek P, Aboudrare A (2004) Adaptation of crop management to water-limited environments. *Europ J Agron* 21:443-446. doi:10.1016/j.eja.2004.07.006
- Delecolle R, Ruget F, Gosse G Ripoche D (1995) Possible effects of climate change in wheat and maize crops in France in: *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*, Rosenzweig, C. et al. (Eds), ASA Special Publication No. 59, Madison, WI, 382 p
- Déqué M (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Glob Planet Change* 57:16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Déqué M, Drevet C, Braun A, Cariolle D (1994) The ARPEGE-IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics* 10:249-266. Doi: 10.1007/BF00208992
- Déqué M, Piedelievre J-P (1995) High-Resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics* 11:321-339. Doi: 10.1007/BF00215735
- Dijkstra P, Schapendonk AHMC, Groenwold K, Jansen M, Van de Geijn SC (1999) Seasonal changes in the response of winter wheat to elevated atmospheric CO₂ concentration grown in open-top chambers and field tracking enclosures. *Glob Change Biol* 5 (5): 563–576. doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00249.x
- Djermoun A (2009) La production céréalière en Algérie: les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie* (1) :45-53.
- Doorenbos J, Kassam A (1979) Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33.
- Drake BG, González-Meler MA (1997) More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Plant Mol Biol* 48: 609–639. doi: 10.1146/annurev.arplant.48.1.609
- Duncan WG, Loomis RS, Williams WA, Hanau R (1967) A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 38:181–205. doi:10.1016/j.gloplacha.2008.02.002
- Easterling W, Apps M (2005) Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: a view from the IPCC. *Clim Change* 70:165–189. 10.1007/1-4020-4166-7-8
- Easterling WE et al (2007) Food, fibre and forest products. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth*

- assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 273–313
- Ecrement Y (1970) Etude agro-pédologique de la plaine de la Mitidja. Echelle :1/50000è, 130p
- Eddy JA (1976) The Maunder minimum. *Science, New Series* 192(4245):1189-1202.
- Ekström M, Fowler HJ, Kilsby CG, Jones PD (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2: Future estimates and use in impact studies. *J Hydrology* 30: 234–251. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.019
- El Afandi G, Khalil FA, Ouda SA (2010) Using irrigation scheduling to increase water productivity of wheat-maize rotation under climate change conditions. *Chilean J of Agricultural Res* 70: 474–484.
- El-Shaer M H, Rosenzweig C, Iglesias A, Eid H M, Hillel D (1996) Possible scenarios for Egyptian agriculture in the future. *Mitig Adapt Strat Glob Change* ,1(3) :233-250. doi: 10.1007/BF00517805
- Engvild KC (2003) A review of the risks of sudden global cooling and its effects on agriculture. *Agric For Meteorol* 115: 129–139. doi:10.1016/S0168-1923(02)00253-8
- Evans L T, Fischer R A (1999) Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Science Society of America* 35 :1544-1551
- Ewert F, Rodriguez D, Jamieson P, Semenov MA, Mitchell RAC, Goudriaan J, Porter JR, Kimball BA, Pinter Jr PJ, Manderscheid R, Weigel HJ, Fangmeier A, Fereres E, Villalobos F (2002) Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agric Ecosyst Environ* 93: 249–266. doi:10.1016/S0167-8809(01)00352-8
- Fahad MA Alkolibi (2002) Possible effects of global warming on agriculture and water resources in Saudi Arabia: impacts and responses. *Clim. Change* 54: 225–245. 10.1023/A:1015777403153
- Fangmeier A, Grütters U, Hertstein U, Sandhage-Hofmann A, Vermehren B, Jäger HJ (1996) Effects of elevated CO₂, nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat. 1. Growth and yield. *Environ Pollut* 91:381_ /390
- FAO (2004) The state of food insecurity in the world. Food and Agricultural Organisation of the United Nation, Rome, 41 p

- Farquhar GD, Dubbe DR, Raschke K (1978) Gain of the feedback loop involving carbon dioxide and stomata. *Plant Physiol*: 62: 406–412.
- Ferris R, Ellis RH, Wheeler TR, Hadley P (1998) Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Ann Bot* 82:631–639
- Ferrise R, Moriondo M, Bindi M (2011) Probabilistic assessments of climate change impacts on durum wheat in the Mediterranean region. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:1293–1302. doi:10.5194/nhess-11-1293-2011
- Fischer G, Shah M, Van Velthuizen H (2002) Climate Change and agricultural Vulnerability. World Summit on sustainable Development, Johannesburg, South Africa. Available at: <http://ivm5.ivm.vu.nl/adaptation/project/files/File/>
- Førland EJ, van Engelen A, Ashcroft J, Dahlstrom B, Demaree G, Frich P, Hanssen-Bauer I, Heino P, Jonsson T, Mietus M, Müller-Westermeier G, Palsdottir T, Tuomenvirta H, Vedin H (1996) Change in “normal” precipitation in the North Atlantic region (2nd edn). DNMI Report 7/96 Klima
- Fowler HJ, Ekstro M, Kilsbya CG, Jones PD (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. *J Hydrology* 300:212–233. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.017
- Francisco J, Meza Daniel Silva (2009) Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic Change* 94 :143-156. doi: 10.1007/s10584-009-9544-z
- Gallop G, Hammond A, Raskm P, Swart R (1997) Branch Points. Pole Stat Series Report 7, Stockholm Environment Institute, Boston, MA
- Garcia de Cortazar I (2006) Adaptation du modèle STICS a la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d’une étude du changement climatique à l’échelle de la France. Thèse doc, ENSA de Montpellier, 289 pp
- Gebhart R (1967) On the significance of the shortwave CO₂-absorption in investigations concerning the CO₂-theory of climatic change. *Theo Appl Climato* 15: 52-61. doi:10.1007/BF02319110
- Gerstengarbe FW, Werner PC (2007) Der rezente Klimawandel. In Endlicher W, Gerstengarbe FW (Eds) *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Humboldt University, Berlin, pp 34–43.

- Ghaffari A, Cook HF, Lee HC (2002) climate change and winter wheat management: A modeling scenario for south-eastern England. *Climat Change* 55: 509–533. doi:10.1023/A:1020784311916
- Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, Moriondo M, Kostopoulou E, Goodess CM (2009) Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. *Glob Planet Change* 68: 209–224. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.06.001
- Gibelin AL, Déqué M (2003) Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyna* 20:327-339. doi: 10.1007/s00382-002-0277-1
- Gifford RM, Morison JIL (1993) Crop [wheat] responses to the global increase in atmospheric carbon dioxide concentration. In: *International Crop Science 1. Proceedings of the International Crop Science Congress* [Buxton DR, Shibles R, Forsberg RA, Blad BL, Asay KH, Paulsen GM, Wilson RF (Eds.)]. Crop Science Society of America, Madison, USA, pp. 325-331.
- Gillet M (1979) Les graminées fourragères. Description, fonctionnement applications à la culture de l'herbe. Ed Gauthier-Villars, Collection "Nature et Agriculture", 306 pp
- Gimeno L, Ribera P, Iglesias R, de la Torre L, Garcia R. Hernandez E (2002) Identification of empirical relationships between indices of ENSO and NAO and agricultural yields in Spain. *Clim Res*: 21 (2): 165–172.
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global Planet Change* 63(2-1):90–104. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
- Gitay H, Brown S, Easterling W, Jallow B (2001) Ecosystems and their goods and services. In McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Giunta F, Motzo R, Deidda (1993). Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticum in a Mediterranean environment. *Field Crop Res*, 33 :399-409. doi:10.1016/0378-4290(93)90161-F
- Godwin DC, Singh U (1998) Cereal growth, development and yield. In: Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK (eds) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands

- Graux AI (2011) Modélisation des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes prériaux. Voies d'adaptation des systèmes fourragères. Thèse doc, Univers Blaise Pascal, Clémont Férrand, 528p
- Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, Bulygina O (1999) Indicators of climate change for the Russian Federation. *Climatic Change* 42:219–242. doi: 10.1023/A:1005480719118
- Guerenã A, Ruiz-Ramos M, Di'az-Ambrona CH, Conde J, Mi'nguez MI (2001) Assessment of climate change and agriculture in Spain using climate models. *Agron J* 93:237–249
- Hakanson L (1995) Optimal size of predictive models. *Ecol Model*: 78, 195–204.
- Hallegatte S (2008) Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob Environ Change* 19: 240–247. doi :10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003
- Hamlaoui-Moulai L, Mesbah M, Souag-Gamane D, Medjerab A (2013). Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Nat. Hazar.* 65(3):1293-131. doi:10.1016/0304-3800(93)E0103-A
- Hammer GL, Kropff MJ, Sinclair TR, Porter JR (2002) Future contributions of crop modelling – from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur J Agron* 18(1-2):15-31. doi:10.1016/S1161-0301(02)00093-X
- Hansen JW, Jones JW (2000) Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agric Syst* 65 (1): 43–72. doi:10.1016/S0308-521X(00)00025-1
- Hansen JW, Potgieter A, Tippett MK (2004) Using a general circulation model to forecast regional wheat yields in northeast Australia. *Agric Forest Meteorol* 127 (1–2): 77–92. doi:10.1016/j.agrformet.2004.07.005
- Haylock MR, Peterson T, Abreu de Sousa JR, Alves LM, Ambrizzi T, Baez J, Barbosa de Brito JI, Barros VR, Berlato MA, Bidegain M, Coronel G, Corradi V, Garcia VJ, Grimm AM, Jaildo dos Anjos R, Karoly D, Marengo JA, Marino MB, Meira PR, Kingumbi A, Bargaoui Z, Hubert P (2005) Investigations sur la variabilité pluviométrique en Tunisie centrale. *Hydrolo Sci J* 50, 1–508.
- Hellmuth ME, Osgood DE, Hess U, Moorhead A, Bhojwani H (2009). Index insurance and climate risk: prospects for devloppment and disaster management. *Climate and society* N°2. International Research Institute for climate and society 5IRI, Colombia University, New York.
- Hertig E (2004) Niederschlags- und Temperatur abschätzungenfür den Mittelmeerraum unteran thropogenverstärktem Treibhauseffekt. University of Wuerzburg, Wuerzburg.

- Hertig E, Jacobeit J (2008b) Downscaling future climate change: temperature scenarios for the Mediterranean area. *Global and Planetary Change* 63: 127–131. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.003
- Hess TM, Stephens W, Maryah UM (1995) Rainfall trends in the north east arid zone of Nigeria 1961–1990. *Agric For Meteorol* 74: 87–97. doi:10.1016/0168-1923(94)02179-N
- Hitz S, Smith J (2004) Estimating global impacts from climate change. *Glob Environ Change* 14, 201–218. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.04.010
- Hoogenboom G (2000) Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agri For Meteorolo* 103: 137–157. doi:10.1016/S0168-1923(00)00108-8
- Horton R, Gornitz V, Bowman M (2010) Climate observations and projections. In: *Report Meira Filho* [Callendar BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds.)]. *Annals of the New York Academy of Sciences, New York City Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 41-62
- Hulme M, Carter TR (2000) The changing climate of Europe. In: *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe* [Parry ML (ed.)]. Jackson Environment Institute, Norwich, UK
- Hypatia NASSOPOULOS (2012) Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée. Thèse doc. Univ Paris-Est, 173 pp.
- IAASTD (2009) International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development (IAASTD): global report. In: McIntyre, B.D., Herren, H.R., Wakhungu, J., Watson, R.T. (Eds.), *International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development: Global Report*. Island Press, p. 590.
- Iglesias A, Minguez M I (1995) Perspectives for maize production in Spain under climate change. In *Agriculture: Crop Modeling Study* [Rosenzweig C, Iglesias A (Eds)]. EPA, Washington, DC
- IPCC (1996) *Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 571 p

- IPCC (2000) Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Summary for Policymakers. IPCC, Geneva.
- IPCC (2001) IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001. IPCC, Geneva.
- IPCC (2001a) Climate Change 2001: The Scientific Basis [Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 p
- IPCC (2007) Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- ITGC (2001) la culture intensive du blé. 2^{ème} édition actualisée, El Harrach, Alger.
- ITGC (2006) Guide des principales varieties de cereals à paille en Algérie, 41 p
- Jablonski LM, Wang X, Curtis PS (2002) Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. *New Phytol* 156:9–26
- Jamieson PD, Semenov MA (2000) Modeling nitrogen uptake and redistribution in wheat. *Field Crops Res* 68 (1):21-29. doi:10.1016/S0378-4290(00)00103-
- Jamieson PD, Semenov MA, Brooking IR, Francis GS (1998) Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur J Agron* 8:161–179. doi:10.1016/S1161-0301(98)00020-3
- Janzen MH (1987) Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. *Can J Soil Sci* 67: 845–856
- Jones PD, Moberg A (2003) Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *J Climate* 16:206–223
- Jonesa PGn, Thornton PK (2003) "The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055". *Global Environ Change* 13: 51-59. doi:10.1016/S0959-3780(02)00090-0
- Kaiser HM, Riha SJ, Wilks DS, Rossiter DG, Sampath R (1993) A farm-level analysis of economic and agronomic impacts of gradual climate warming. *Am J Agric Econ* 75(2):387–398

- Kang S, Zhang F, Hu X, Zhang J (2002) Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water status. *Plant Soil* 238 (1): 69–77. doi:10.1023/A:1014244413067
- Kapetanaki G, Rosenzweig C (1997) Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece: A simulation study with CERES-Maize. *Mitig Adapt Strat* 1(3):251-271. doi:10.1023/B:MITI.0000018044.48957.28
- Khaledian M R, Mailhol J C, P Ruelle, Rosique P (2009) Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management* 96(5) : 757 -770. doi:10.1016/j.agwat.2008.10.011
- Kimball BA (1983) Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron J* 75:779–788
- Kimball BA, Idso SB (1983) Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. *Agric Water Manag* 7: 55–72. doi:10.1016/0378-3774(83)90075-6
- Kingumbi A, Bargaoui Z, Hubert P (2005) Investigation of the rainfall variability in central Tunisia / Investigations sur la variabilité pluviométrique en Tunisie central. *Hydrolo Sci J* 50(3)493-508. doi: 10.1623/hysj.50.3.493.65027
- Kolai T (2008) Climat et dysfonctionnement des agro-systèmes céréaliers : cas des Wilayates Sétif, Bordj Bou Arreridj et Mila. Thèse. Mag. ENSA, Alger, 102pp.
- Kostopoulou E, Jones PD (2005) Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean. *MeteorolAtmosPhys* 89:69–85. doi: 10.1007/s00703-005-0122-2
- Krishnan P, Ramakrishnan B, Rao KS, Dash RN (2009) Simulation Studies to Characterize the Impact of Climate Change on Crop Production and to Identify Strategies for Adaptation and Mitigation. In *Climate Change and Crops* [Singh SN (Ed.)]. Springer, 375 pp. doi 10.1007/978-3-540-88246-6
- Lashkari A, Bannayan M (2012) Agrometeorological study of crop drought vulnerability and avoidance in northeast of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1) : 17-25. doi: 10.1007/s00704-012-0769-9

- Latiri K, Lhomme JP, Annabi M, Setter TL (2010) Wheat production in Tunisia : Progress, inter- annual variability and relation to rainfall. *Europ J Agro* 33:33-42. doi:10.1016/j.eja.2010.02.004
- Lavalle C, Micale F, Houston TD, Camia A, Hiederer R, Lazar C, Conte C, Amatulli G, Genovese G (2009) Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review. *Agron Sustain Dev* 29 : 433–446. doi: 10.1051/agro/2008068
- Le Treut H (2003) Les scenarios globaux de changements climatique et leurs incertitudes. *Geoscience* 335:525-533. doi:10.1016/S1631-0713(03)00096-8
- Leggett J, Pepper WJ, Swart RJ (1992) Emissions scenarios for the IPCC: an update. In: *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Scientific Assessment* [Houghton JT, Callander BA, Varney SK (eds)] Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 69–95
- Lemaire G (1987) Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée pendant l'hiver et le printemps : effets des facteurs climatiques. Thèse doctorat d'état, Université de Caen, France, 96 pp
- Lhomme JP, Katerji N (1991) A simple modelling of crop water balance for agrometeorological applications. *Ecol Model* 57:11–25. doi:10.1016/0304-3800(91)90052-3
- Lhomme JP, Mougou R, Mansour M (2009) Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Clim Chang* 96:549-564. doi:10.1007/s10584-009-9571-9
- Li FS and Lu SN (2000) Study on the fertigation and its application. *Plant Nutri Fertiliz Sci* 6(2):233-240
- Li JH, Dugas WA, Hymus GJ, Johnson DP, Hinkle CR, Drake BG, Hungate BA (2003) Direct and indirect effects of elevated CO₂ on transpiration from *Quercus myrtifolia* in a scrub-oak ecosystem. *Glob Change Biol* 9 (1): 96–105. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00557.x
- Lin JL, Kiladis GN, Mapes BE, Weickmann KM, Sperber KR, Lin W, Wheeler MC, Schubert SD, Del Genio A, Donner LD, Emori S, Gueremy JF, Hourdin F, Rasch PJ, Roeckner E, Scinocca JF (2006) Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4climate models. Part I: convective signals. *J Climate* 19: 2665–2690
- Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, Mastrandrea MD, Falcon WP, Naylor RL (2008) Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* 319, 607–610

- Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nöbelsberger J, Ort DR (2006) Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312, 1918–1921
- Loomis RS, Rabbinge R, Ng E (1979) Explanatory models in crop physiology. *Annu Rev Plant Physiol* 30:339–367
- Ludlow M M, Muchow RC (1990) A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in agronomy* 107-105
- Ludwig F, Asseng S (2006) Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agric Syst* 90:159–179. doi:10.1016/j.agsy.2005.12.002
- Luo Q, Bellotti W, Williams M, Bryan B(2005) Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agric Forest Météor* (132):273-285. doi:10.1016/j.agrformet.2005.08.003
- Mailhol JC, Zaïri A, Slatni A, Ben Nouna B, El Amami H (2004) Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management* 70:19-37. doi:10.1016/j.agwat.2004.06.001
- Manabe S (1969) Climate and the ocean circulation : I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon Wea Rev* 97: 739-774
- Manabe S, Bryan K (1969) Climate calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model. *J Atmos Sci* 26: 786-789
- Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, Weigel HJ (2003) Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *Europ J Agronomy* 19:411-425. doi:10.1016/S1161-0301(02)00133-8
- Marengo J, Camargo CC (2007) Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *Inter J of Climatolo* 28 893–904. doi:10.1002/joc.1584.
- Marengo J, Jones R, Alves L M, Valverde M C (2009) Future change of temperature and precipitation extremes in south America as driven from the PRECIS regional climate modeling system. *Intern J Climt* 292241-2255. doi: 10.1002/joc.1863
- Mason SJ (1996) Climatic change over the Lowveld of South Africa. *Climatic Change* 32 35–54. doi:10.1007/BF00141277
- Matthews R (2002) Crop-soil simulation models: Applications in developing countries. In [Matthews R, Stephens W (eds.)]. CABI Publishing, Wallingford, UK

- Mavi H S, Tupper G J (2004) *Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press, New York, 364p
- Mearns LO, Katz RW, Schneider H (1984) Extreme high temperature events: changes in their probabilities with changes in mean temperature. *J Clim Appl Meteorol* 23:1601–1613
- Mearns LO, Rosenzweig C, Goldberg R (1997) Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Climatic Change* 35 367–396. doi:10.1023/A:1005358130291
- Meddi M, Talia A (2008) Pluviometric regime evolution in the North of Algeria. *Arab Gulf Journal of Scientific Research* 26 152–162.
- Menzel A, Estrella N, Fabian P (2001) Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Glob Change Biol* 7 657–666. doi: 10.1111/j.1365-2486.2001.00430.x
- Mertz O, Halsnaes K, Olesen JE, Rasmussen K (2009) Adaptation to climate change in developing countries. *Environ Manag* 43: 743–752. doi: 10.1007/s00267-008-9259-3
- Mohamadou M (2000) Evaluation et caractérisation des facteurs agroclimatiques. Cas de la céréaliculture pluviale en zones semi-arides (BBA, Sétif et Mila). *Mém Ing Agro, INA*, 59 p
- Monsi M, Saeki T (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap J Bot* 14:22-52
- Monteith J L (1963) ‘Gas Exchange in Plant Communities’. In: *Environmental Control of Plant Growth* [Evans LT (eds.)]. Academic Press, New York, pp 95-112
- Monteith JL (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 281: 277-294. doi: 10.1098/rstb.1977.0140
- Monteith JL, Unsworth MH (1990) *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London, 291 p
- Moonen AC, Ercoli L, Mariotti M, Masoni A (2002) Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agri Fores Meteorol* 111:13-27. doi:10.1016/S0168-1923(02)00012-
- Moriondo M, Giannakopoulos C, Bindi M (2011) Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Clim Change* 104:679–701. doi:10.1007/s10584-010-9871-0

- Morison JIL, Lawlor DW (1999) Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell Environ* 22: 659-682. doi:10.1046/j.1365-3040.1999.00443.x
- Mougou R, Mansour M, Iglesias A, Zitouna Chebbi R, Battaglini A (2011) Climate change and agricultural vulnerability: a case study of rain-fed wheat in Kairouan, Central Tunisia. *Reg Environ Chang* 11: 137-142. doi:10.1007/s10113-010-0179-4
- Mulholland BJ, Craigon J, Black CR, Colls JJ, Atherton J, Landon G (1997) Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Exp Bot* 48: 113-122. doi: 10.1093/jxb/48.1.113
- Mulholland BJ, Craigon J, Black CR, Colls JJ, Atherton J, Landon G (1998) Growth, light interception and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under elevated CO₂ and O₃ in open-top chambers. *Glob Change Biol* 4: 121-130. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00112.x
- Munk, W., Dzieciuch, M., and Jayne, S. (2002). Millennial climate variability: Is there a tidal connection?. *J of Climate* 15: 370-385
- Nakicenovic, N. & Swart, R. (eds) (2000) *Special Report on Emissions Scenarios*, 612 p Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Neelin JD, Münnich M, Su H, Meyerson JE, Holloway CE (2006) Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 6110–6115
- Nefzi A (2012) *Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture: étude théorique et application au cas de la Tunisie*. Thèse de doctorat, AgroParitec, 278pp.
- Nemecek T, Derron JO, Roth O, Fischlin A (1996) Adaptation of a crop-growth model and its extension by a tuber size function for use in a seed potato forecasting system. *Agric Syst* 52 (4): 419–437. doi:10.1016/S0308-521X(96)00034-0
- Niang I, Ruppel OC, Abdrabo MA, Essel A, Lennard C, Padgham J, Urquhart P (2014) Africa. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR., White L.L. (eds.)].

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1199-1265
- Nicholls N (1985) Impact of the Southern Oscillation on Australian crops. *J Climatol* 5 (5): 553–560. doi: 10.1002/joc.3370050508
- Norby RJ, Luo Y (2004) Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in multi-factor world. *New Phytol* 162:281–293. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01047.x
- Nuñez M, Solman S, Cabré MF (2009) Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change sceñarios in the late twenty-first century. *Climate Dynamics* 30 : 533–552. doi :10.1007/s00382-008-0449-8
- Olesen J E, Bindi M (2002) Review Consequences of Climate Change and Policy for European Agricultural Productivity, land use policy. *Eur J Agro* 16:239-262. doi:10.1016/S1161-0301(02)00004-7
- Oppenheimer C (2003) Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Prog Phys Geogr* 27: 230–259. doi: 10.1191/0309133303pp379ra
- Ottersen G Planque B, Belgrano A, Post E, Reid PC, Stenseth NC (2001) Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia* 128 (1): 1–14. doi:10.1007/s004420100655
- Paeth H, Born K, Girmes R, Podzun R, Jacob D (2009) Regional climate change in Tropical and Northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *J Clim* 22: 114-132
- Pala M, Stöckle CO, Harris HC (1996) Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using Crop Syst. *Agricultural Syst* 51: 147–163. doi:10.1016/0308-521X(95)00043-5
- Palutikof JP, Wigley TML (1996) Developing climate change scenarios for the Mediterranean region. In: *Climate change and the mediterranean*, vol. 2 [Jeftic L, Keckes S, Pernetta JC (eds)]. Arnold, London, pp 27–56
- Parry ML (2000) Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe. The Europe ACACIA Project, Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich

- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Fischer G, Livermore MTJ (1999) Climate change and world food security: a new assessment. *Glob Environment Change* 9: S51–S67. doi:10.1016/S0959-3780(99)00018-7
- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fisher G (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Glob Environ Change* 14:53–67. doi:10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008
- Patricola C, Cook K (2010) Northern African climate at the end of the twentyfirst century: an integrated application of regional and global climate models. *Climate Dynamics* 35: 193–212. doi: 10.1007/s00382-009-0623-7
- Penman H L (1948) "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc Roy Soc London, A193* : 120-146. doi: 10.1098/rspa.1948.0037
- Pierce DW, Barnett TP, Santer BD, Gleckler PJ (2009) Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106: 8441–8446.
- Pinter PJ, Kimball BA, Garcia RL, Wall GW, Hunsaker DJ, Lamorte RL (1996) Free-air CO₂ enrichment: responses of cotton and wheat crops. In: *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems* [Koch GW, Mooney HA (Eds.)]. Academic Press, San Diego
- Plummer N, Salinger MJ, Nicholls N, Suppiah R, Hennessy KJ, Leighton RM, Trewin B, Page CM, Lough JM (1999) Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. *Climatic Change* 42: 183–202. doi: 10.1007/978-94-015-9265-9_12
- Podestá GP, Messina CD, Grondona MO, Magrin GO (1999) Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño-Southern Oscillation. *J Appl Meteorol* 38:1488–1498
- Porter JR, Jamieson PD, Grace PR (2004). Wheat production systems and climate. *Crisos*. In *Terrestrial Ecosystems in a Changing World* [Josep G Canadell, Diane E. Pataki, Louis F. Pitelka (eds.)]. *Global Change – The IGBP Series*, Springer
- Prévoit L (2012) Introduction à la modélisation des cultures. Notes du cours « Eau et production végétale ». SUPAGRO, LISAH, 28 p
- Quintana-Gomez RA (1999) Trends of maximum and minimum temperatures in Northern South America. *J Climate* 12: 2104-2112

- Raes D, Geerts S, Kipkorir E, Wellens J, Sahli A (2006) Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agr Water Manag* 81:335–357. doi:10.1016/j.agwat.2005.04.006
- Ramanathan V, Cicerone R J, Singh H B, Kiehl JT (1985) Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change. *J Geophys Res* 90: 5547-5566. doi: 10.1029/JD090iD03p05547
- Ramirez CAJ, Anderson B, Leibing C, Aggarwal P (2010). Scenario of climate change within the context of agriculture. In *Climate change and crop production* [Matthew P Reynolds (eds.)]. CABI Climate Change series, CABI Head Office, UK, pp 292.
- Reichler TJ, Kim J (2008) How well do coupled models simulate today's climate? *Bulletin of the American Meteorological Society* 89, 303–311.
- Reilly J, Tubiello F, McCarl B, Abler D, Darwin R, Fuglie K, Hollinger S, Izaurralde C, Jagtap S, Jones J, Mearns L, Ojima D, Paul E, Paustian K, Riha S, Rosenberg N, Rosenzweig C (2003) U.S. agriculture and climate change: new results. *Clim Change* 57(1):43–69. doi: 10.1023/A:1022103315424
- Richard R, Heim Jr (2002) A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bull Amer Meteor Soc* 83: 1149–1165
- Richter GM, Semenov MA (2005) Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. *Agric Syst* 84: 77-97. doi:10.1016/j.agry.2004.06.011
- Riha SJ, Wilks DS, Simoens P (1996) Impact of temperature and precipitation variability on crop model predictions. *Clim Change* 32(3):293–311. doi: 10.1007/BF00142466
- Ritchie JT (1998) Soil water balance and plant water stress. In: *Understanding options for agricultural production* [Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK (eds)]. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, pp 41–54
- Robinson E, Robbins R C (1970) Gaseous Atmospheric Pollutants from Urban and Natural Sources. *Glob Eff Environment Poll* 50-66.
- Robinson PJ (2000) Temporal trends in United States dew point temperatures. *Int J Climatol* 20: 985-1002. doi:10.1002/1097-0088(200007)20:9
- Rosenzweig C, Parry ML (1994) Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367:133–138
- Rosenzweig C, Parry ML, Fischer G, Fromberg K (1993) "Climate Change and World Food Supply". Research Report, (3). Environmental Change Unit, University of Oxford.

- Rosenzweig C, Tubiello F N (1997). Impacts of global climate change on Mediterranean agriculture: current methodologies and future directions An introductory essay. *Mitig Adapt Strat Glob Chang* 1: 219-232. doi:10.1007/BF00517804
- Rowell D (2005) A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability. *Clim Dyn* 25: 837-849. doi:10.1007/s00382-005-0068-6
- Saha S, Sehgal V K, Nagarajan S, Pal M (2012) Impact of elevated atmospheric CO₂ on radiation utilization and related plant biophysical in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Agric and Forest Meteorol* 158-159:63-70. doi:10.1016/j.agrformet.2012.02.003
- Salinger MJ, Stigter CJ, Dasc HP (2000) Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change. *Agri For Meteorol* 103: 167-184. doi:10.1016/S0168-1923(00)00110-6
- Sanabria J, Lhomme JP (2013) Climate change and potato cropping in the Peruvian Altiplano. *Theor Appl Climatol* 112: 683-695. doi: 10.1007/s00704-012-0764-1
- Sanabria J, Calanca P, Alarcón C, Canchari G (2014) Potential impact of early twenty-first century changes in temperature and precipitation in rainfed annual crops in the Central Andes of Peru. *Reg Environ Change* 14: 1533-1548. doi: 10.1007/s10113-014-0595-y
- Sandaña P, Pinochet D (2011) Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *Field Crops Research* 12: 311-319. doi:10.1016/j.fcr.2010.11.005
- Sayre K D, Rajarman S, Fisher R A (1997) Yield potential progress in short bread wheat's in northwest Mexico. *Crop Sci* 37:36-42
- Schilling J, Freier K P, Hertig E, Scheffran J (2012) Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agricul Ecosys Environ* 156:12-26. doi:10.1016/j.agee.2012.04.021
- Schneider SH, Semenov S, Patwardhan A, Burton I, Magadza CHD, Oppenheimer M, Pittock AB, Rahman A, Smith JB, Suarez A, Yamin F (2007) Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. In: *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability* [Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds.)]. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 779–810

- Schonwiese CD, Rapp J (1997) Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891-1990, Kluwer Academic publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- Scott Greene J, Erin Maxwell (2007) Climatic impacts on winter wheat in Oklahoma and potential applications to climatic and crop yield prediction. *Int J Biometeo* 52:117-126
10.1007/s00484-007-0104-9
- Seguin B, Baculat B, Baret F, Brisson N, Huard F, Ruget F (2004a) On overview of the consequences of 2003 summer for agriculture in France. *Proceeding of the 8th European Society of agronomy congress*. *Europ J Agron* 335-336.
- Seguin B, Stegel (2002) Changements climatiques et effet de serre. Technical report, INRA mensuel.
- Seltzer P (1949) *Le climat de l'Algérie*. Alger, 219p
- Seneweera SP, Conroy JP (2005) Enhanced leaf elongation rates of wheat at elevated CO₂: is it related to carbon and nitrogen dynamics within the growing leaf blade? *Environ Exp Bot* 54: 174–181. doi:10.1016/j.envexpbot.2004.07.002
- Sinclair T, Muchow R (1999) Radiation use efficiency. *Adv Agron* 65:215-265.
- Sirangelo B, Ferrari E (2003) Unaverifica statistica del lapresenza di variazioninella pluviometria recente relativa ad un bacinodell'Italia meridionale. *Convegno su: La difesa idraulica del territorio*, Trieste, 10–12 settembre 2003
- Sirotenko O (1999) The global greenhouse effect, agroecosystems and future of agriculture. Paper presented at the International Workshop Agrometeorology in the 21st Century, Needs and Perspectives, Accra, Ghana
- Smadhi D, Mouhouche B, Mohamedou M et Semiani M (2001) variabilité des précipitations et conséquences sur la céréaliculture en zone semi-arides. *Semin. Ass. Maroc, "AMAECO"*, Rabat, pp10-19
- Smadhi D, Zella L (2009) Céréaliculture en sec et précipitations annuelles: le cas du Nord de l'Algérie. *Rev Secheresse* 20(2) :199-203.
- Smadhi D, Zella L (2012) The pluviometrical deficiencies in the pluvial cereal regions in Algeria. *African Journal of Agricultural research*, 7(48):6413-6420
- Smadhi D, Zella L, Semiani M, Chabane A, Fedjer Z (2013) Evolution des cultures céréalières (1876-2011) en Algérie et perspectives. *Recherche agronomiques*.
- Smagorinsky J, Manabe S, Holloway J L (1965) Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere 1. *Monthly Weather Review* 93: 727-768.

- Solman S, Nuñez M, Cabré MF (2008) Regional climate change experiments over southern South America. I: Present climate. *Climate Dynamics* 30: 533–552. doi:10.1007/s00382-007-0304-3
- Soltner D (1987) Les bases de la production végétale. Le sol- le climat- la plante. Tome II. le climat : Météorologie-Pédologie- Bioclimatologie. Ed. Sciences et techniques agricoles.
- Sommerer A, Glazirina R, Yuldasheva T, Otarov A, Ibraev M, Martynov L, Bekenov M, Kholov B, Ibragimov N, Kobilov R, Karaev S, Sulstonov M, Khasanov F, Esanbekov M, Mavlyanov D, Isaev S, Abdurahimov S, Ikramov R, Shezdyukov L, de Pauw E (2013) Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosys Environ* 178:78– 99
- Soussana JF, Graux AI, Tubiello FN (2010) Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *J Exp Bot* 61: 2217–2228. doi: 10.1093/jxb/erq100
- Spaeth SC, Sinclair TR (1985) Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. *Agron J* 77:207–211
- Splinter WE (1974) Modeling of plant growth for yield prediction. *Agric Meteorol* 14, 243–253. doi:10.1016/0002-1571(74)90023-5
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E (2009a) AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy J* 101:426-437
- Swain D, Chandrabaskar B, Krishnan P, Rao KS, Nayak SK, Dash RN (2006) Variation in yield, N uptake and N use efficiency of medium and late duration rice varieties. *J Agric Sci (Cambridge)* 144(1):69–83
- Swain D, Heath S, Chandrabaskar B, Krishnan P, Rao KS, Nayak SK, Dash RN (2007) Developing ORYZA 1N for medium- and long-duration rice: Variety selection under non-water-stress conditions. *Agro J (US)* 99:428–440
- Tao F, Zhang Z (2011) Impacts of climate change as a function of global mean temperature: maize productivity and water use in China. *Clim Change* 109: 409-432. doi: 10.1007/s10584-010-9883-9
- Tao FL, Yokozawa M, Zhang Z, Hayashi Y, Grassl H, Fu CB (2004) Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asian summer monsoon and El Niño Southern Oscillation. *Clim Res* 28 (1): 23–30.

- Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster J, Meehl G. 2006. Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change* 79: 185–211. doi: 10.1007/s10584-006-9051-4
- Teixeira JL, Fernando RM, Pereira LS (1995) Irrigation scheduling alternative for limited water supply and drought. *ICID J* 44:73–87
- Terray L, Braconnot P (2007) Livre Blanc ESCRIME (Étude des Scénarios Climatiques). IPSL & Météo-France, 39 p
- Terray L, Page C, Déqué M, Flecher C (2012) L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. Livre Vert du projet CLIMATOR, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Ed. ADEME, 336p
- Thornley JHM (2001) Modelling grassland ecosystems. In: Proceedings of the 19th International Grassland Congress [Mattos WRS, dailva SC (Eds.)]. São Paulo, Brazil, 1029–1035
- Thornton PK, Bowen WT, Ravelo AC, Wilkens PW, Farmer G, Brock J, Brink JE (1997) Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modeling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agric Forest Meteorol* 83 (1–2): 95–112. doi:10.1016/S0168-1923(96)02348-9
- Tilman D, Gassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418:671-676.
- Timmermann A, Oberhuber J, Bachler A, Esch M, Latif M, Roeckner E (1999) Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398, 694–697
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Sabir M, Attalah S, Aloui A (2011) Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim Dyn* 37: 237-252. doi:10.1007/s00382-010-0804-4
- Tubiello FN, Donatelli M, Rosenzweig C, Stockle CO (2000) Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Eur J Agron* 13: 179–189. doi:10.1016/S1161-0301(00)00073-3
- Türkes M (1996) Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. *Int J Climatol* 16: 1057–1076
- UNFCCC (2007) Climate change impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries. United Nations Framework Convention on Climate Change, 64p

- United States National Assessment (2000). Changing climate and changing agriculture, Draft Report of the Agricultural Sector Assessment Team. Washington, DC: U.S. Climate Change Program/U.S. Global Change Research Program.
- Van Oijen M, Ewert F (1999) The effects of climatic variation in Europe on the yield response of spring wheat cv. Minaret to elevated CO₂ and O₃: an analysis of open-top chamber experiments by means of two crop growth simulation models. *Eur J Agron* 10: 249–264. doi:10.1016/S1161-0301(99)00014-3
- Ventrella D, Charfeddine M, Moriondo M, Rinaldi M, Bindi M (2012) Agronomic adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: irrigation and nitrogen fertilization. *Reg Environ Chang* 3:204-219. doi:10.1007/s10113-011-0256-3
- Viglizzo EF, Roberto ZE, Filippin MC, Pordomingo AJ (1995) Climate variability and agroecological change in the central Pampas of Argentina. *Agric Ecosyst Environ* 55, 7–16. doi:10.1016/0167-8809(95)00608-U
- Vincent LA, Peterson TC, Barros VR, Marino MB, Rusticucci M, Carrasco G, Ramirez E, Alves LM, Ambrizzi T, Berlato MA, Grimm AM, Marengo JA, Molion L, Moncunill DF, Rebello E, Anuncia, c~ao YMT, Quintana J, Santos JL, Baez J, Coronel G, Garcia J, Trebejo I, Bidegain M, Haylock MR, Karoly D (2005) Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *J of Climate* 18: 5011–5023.
- Viner D, Morison J, C Wallace (2006) Recent and future climate change and their implications for plant growth In *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing, UK, 213p
- Vossen P, Rijks D (1995) Early crop yield assessment of the E.U. countries: the system implemented by the Joint Research Centre. EUR 16318, Publication of the Office for Official Publications of the EC, Luxembourg
- Wang HL, Gan YT, Wanga RY, Niu JY, Zhao H, Yang QG, Li GCa (2008) Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agri for Meteorol* 148:1242–1251. doi:10.1016/j.agrformet.2008.03.003
- Wang K, Shen RK, Wang FQ (2002) Simulation of biomass formation and nitrogen uptake in winter wheat under different water and nitrogen suppl. *Irrig Drain Sci* 21(1):6 -10
- Watts RG (1980) Climate models and CO₂-induced climatic changes. *Climatic Change* 2: 387-408. doi: 10.1007/BF00137207

- White JW, Hoogenboom G (2010) Crop Response to Climate: Ecophysiological Models. In Climate Change and Food Security (Ed. D Lobell • Marshall Burke). pp196
- White JW, Hoogenboom G (2010) Crop Response to climate: Ecophysiological Models. In climate change and food security. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 197p
- Wigley, T M L (1992) Future climate on the Mediterranean basin with particular emphasis on changes in precipitation. In: Climatic change and the Mediterranean [Jeftic J, Milliman JD, Sestini G (eds.)]. UNEP New York
- World Meteorological Organization (WMO) (1998) The Global Climate System Review, December 1993-May 1996. WMO No. 856. Geneva: WMO.
- World Meteorological Organization/Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) 116 (1998). Expert Meeting on Chemistry of Aerosols, Clouds and Atmospheric Precipitation in the former USSR, St. Petersburg, Russia
- Xavier PK, Duvel JP, Braconnot P, Doblus- Reyes F (2009) An evaluation metric for intraseasonal variability in climate models. Available at: http://www.lmd.ens.fr/jpduvel/Documents/Pub/Xavier_etal_2009_LMA_Metric.pdf
- Xiao G , Zhang Q, Yao Y , Zhao H, Wang R, Bai H, Zhang F (2008) Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China. *Agric Ecosys Environ* 127:37–42. doi:10.1016/j.agee.2008.02.007
- Yun JI (2003) Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agric Syst* 77 (1): 23–38. doi:10.1016/S0308-521X(02)00084-7
- Yunzhou Q, Zhang H, Donga B, Shia C, Li Y, Zhaia H, Liua M (2010) Effects of elevated CO₂ concentration on growth and water use efficiency of winter wheat under two soil water regimes. *Agric Water Manag* 97:1742–1748. doi:10.1016/j.agwat.2010.06.007
- Zhai P, Sun A, Ren F, Liu X, Gao B, Zhang Q (1999) Changes of climate extremes in China. *Climatic Change* 42: 203–218. doi:10.1007/978-94-015-9265-9_13
- Zitouni A (1991) Contribution à l'étude de l'influence des brises sur les facteurs climatiques et la production céréalière en Algérie : Région des hautes plaines de Sétif. Thèse Coct Ini. Paris, Lab Géo Phy, 199p

ANNEXE A

Tableau 1. Résultats de la comparaison des températures mensuelles interannuelles observées et simulées à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	T observée (°C)	T simulée (°C)	t Student- Fisher	T observée (°C)	T simulée (°C)	t Student- Fisher
Janvier	10,6	11,3	0,10797024	5,7	6,7	0,02826314
Février	11,3	11,6	0,46093188	7,0	7,4	0,29806457
Mars	12,9	13,6	0,02699277	9,7	10,3	0,11085229
Avril	14,9	15,3	0,06763032	12,5	13,4	0,01006975
Mai	18,1	18	0,81000011	17,7	18	0,46238899
Juin	22,1	22,5	0,09125487	23,3	24,5	0,02026574
Juillet	25,0	26	0,00192642	26,7	28,7	0,00036457
Août	25,7	26,1	0,17494552	26,4	28,3	0,00021001
Septembre	23,2	24,4	3,5905E-05	21,3	23,1	3,9256E-05
Octobre	19,6	20,2	0,09039537	16,1	17	0,01342403
Novembre	15,2	16,1	0,00877186	10,4	11,7	0,00079829
Décembre	12,1	11,9	0,58386375	6,6	7,1	0,13362778

Tableau 2. Résultats de la comparaison des précipitations mensuelles interannuelles observées et simulées à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	P observée (mm)	P simulée (mm)	t Student- Fisher	P observée (mm)	P simulée (mm)	t Student- Fisher
Janvier	83,7	89,8	0,71110308	34,2	29,5	0,52132072
Février	72,2	93,2	0,21745735	26,4	31	0,3806819
Mars	70,4	52,9	0,13679175	30,4	27,6	0,65169797
Avril	52,1	43,1	0,37754905	39,9	22,8	0,00899953
Mai	43,9	34,7	0,34774634	38,1	21,5	0,01644253
Juin	7,1	11,9	0,19779481	18,6	13,1	0,3031445
Juillet	3,3	5,1	0,45799298	9,9	6,3	0,28789654
Août	8,1	3,5	0,00598368	14,0	5,2	0,00769966
Septembre	33,0	58,5	0,01678737	44,1	47,2	0,73776168
Octobre	66,4	72,3	0,68539387	29,5	44,3	0,07277879
Novembre	89,9	59,5	0,04768306	30,2	44,3	0,12170933
Décembre	97,3	91,1	0,68989261	53,8	38,8	0,07594506

Tableau 3. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées du rayonnement solaire à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	R _s observé	R _s simulé	t Student-Fisher	R _s observé	R _s simulé	t Student-Fisher
Janvier	9,04	8,8	0,33798229	9,6	9,4	0,56789924
Février	11,53	12,5	0,0041444	12,7	13,1	0,15795602
Mars	15,51	15,3	0,62954846	16,6	16,7	0,77004881
Avril	19,22	20,5	0,00100492	20,5	21,5	0,00619265
Mai	22,03	22,9	0,09531182	23,4	23,6	0,69726361
Juin	24,95	24,7	0,55243048	25,9	25,9	0,9241265
Juillet	25,55	25	0,14837246	26,4	26,5	0,70516763
Août	22,74	23,1	0,37629016	23,6	24,8	0,00041255
Septembre	18,53	17,6	0,00330127	18,8	18,2	0,04000268
Octobre	13,53	14,2	0,04286024	14,3	14,6	0,36905137
Novembre	9,68	10,3	0,00492199	10,3	10,5	0,25219336
Décembre	7,93	7,6	0,08771629	8,5	8,1	0,05912772

Tableau 4. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées de l'humidité relative de l'air à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	Hr observée (mm)	Hr simulée (mm)	t Student- Fisher	Hr observée (mm)	Hr simulée (mm)	t Student- Fisher
Janvier	77	77	0,98669716	75	73,3	0,0841076
Février	77	75,4	0,17335266	71	68,2	0,10253113
Mars	76	75	0,56053276	66	62,3	0,06303617
Avril	73	73,8	0,92550407	61	56,3	0,00694349
Mai	75	73,2	0,21655587	57	52,4	0,04058091
Juin	70	70,2	0,54164253	47	42	0,01341778
Juillet	70	66,5	0,01082573	39	35,1	0,03281107
Août	69	68,2	0,43753712	43	38,8	0,03488339
Septembre	72	71,8	0,73613551	56	55,8	0,87951484
Octobre	73	72,2	0,30043447	63	61,2	0,429636
Novembre	75	75	0,81226117	72	69,5	0,15469203
Décembre	78	77,6	0,81771081	78	76,2	0,18454784

Tableau 5. Résultats de la comparaison des valeurs mensuelles interannuelles observées et simulées de la vitesse moyenne du vent à Alger et Bordj Bou Arreridj.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	U observée (mm)	U simulée (mm)	T Student- Fisher	U observée (mm)	U simulée (mm)	T Student- Fisher
Janvier	2,7	2,8	0,91154051	2,7	2,9	0,25511703
Février	2,8	2,5	0,28289007	2,7	2,7	0,77178834
Mars	2,9	2,8	0,73477103	3,2	3,5	0,11514861
Avril	3	3,2	0,43747645	3,3	3,7	0,01733394
Mai	2,9	3,3	0,03111333	3,2	3,4	0,17699886
Juin	3,1	3,3	0,05763851	3,3	4,2	1,2034E-05
Juillet	3	3,1	0,48765892	3,2	3,8	0,01485591
Août	2,9	2,8	0,53902701	3	3,5	0,01688625
Septembre	2,7	3	0,03880833	2,8	2,9	0,24197558
Octobre	2,4	2,7	0,01326361	2,6	3,1	0,00160416
Novembre	2,6	2,9	0,05743373	2,7	3,4	0,01228936
Décembre	2,9	2,8	0,76503882	2,7	2,8	0,68405217

Tableau 6. Résultats de la comparaison entre valeurs moyennes interannuelles observées et simulées de température T, précipitation P, rayonnement solaire R_s , Humidité relative de l'air Hr et vitesse moyenne du vent U.

	Alger			Bordj Bou Arreridj		
	Valeur observée	Valeur simulée	t Student-Fisher	Valeur observée	Valeur simulée	t Student-Fisher
T (°C)	16,5	17,7	5,99368E-05	16,5	17,7	5,60355E-08
P (mm)	718,5	602,8	0,552642504	360,1	421,5	0,160721343
R_s (MJm⁻²j⁻¹)	16,8	13,9	0,6170442	17,8	17,2	0,29626967
H (%)	74	74,6	0,09434654	60	60,8	0,001051702
U (m/s)	3,2	2,6	0,32569998	3,9	3,4	0,06435815

Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie

Résumé

Les différents rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), indiquent le bassin Méditerranéen, particulièrement la zone Nord Africaines, parmi les régions les plus vulnérables aux changements climatiques. Cependant, l'information concernant cette dernière zone reste limitée, principalement du fait de l'indisponibilité des données climatiques. Les études sur le changement climatique et ses impacts n'ont pas touché jusqu'à maintenant à certaines régions de la zone et c'est le cas de l'Algérie. Notre étude vise à compléter ce manque d'information et à initier la recherche sur le sujet de l'impact du changement climatique sur la culture du blé dur, la plus stratégique denrée dans le système alimentaire et dans l'économie nationale de l'Algérie.

Fonction de la disponibilité des données climatiques, deux stations représentatives de deux des trois principales zones céréalières, ont été choisies : Alger dans la région centrale et Bordj Bou Arreridj dans les hautes plaines de l'Est. Des données climatiques observées (1978-2007 à Alger et 1980-2009 à Bordj Bou Arreridj), et des projections du futur lointain (2071-2100), obtenues à partir du modèle climatique ARPEGE de Météo-France, exécutées selon le scénario SRES moyen A1B, ont été utilisées pour faire tourner un simple modèle agro-météorologique de culture préalablement validé avec des données de terrain. Deux options de semis sont testées : un semis dynamique, choisi sur la base des précipitations reçues durant la période traditionnelle de semis, et un semis prescrit avec un apport supplémentaire en eau par irrigation le jour même. Le développement de la culture est modelé utilisant le temps thermique et le rendement maximum est déterminé à partir de l'accumulation du rayonnement solaire. Un indice de stress hydrique est déduit à partir d'un modèle de bilan hydrique et enfin le rendement réel est estimé à partir du rendement potentiel corrigé utilisant l'indice de stress hydrique. Le modèle prend en considération

l'occurrence de périodes de sécheresse durant la croissance de la culture qui peuvent induire un échec partiel ou total du cycle de culture.

Les résultats indiquent un changement climatique non similaire dans les deux zones d'études, mais une tendance à l'aridité est claire particulièrement en printemps. Les températures futures et l'évapotranspiration potentielle augmentent dans les deux régions avec un maximum en printemps et en été. A Alger la pluviométrie diminuera le long de l'année et particulièrement en été. Inversement, à Bordj Bou Arreridj, les précipitations estivales augmenteront significativement. Dans les deux régions d'étude les pluies d'automne sont indiquées s'améliorer dans le climat futur, les possibilités de semis précoce seront meilleures, le cycle de culture sera réduit et la date de récolte prendra place plutôt. A Alger, les rendements tendent à décroître dans le climat futur, alors qu'à Bordj Bou Arreridj, le semis dynamique tendra à maintenir les rendements à leurs niveaux actuels.

Mots clés : Algérie, changement climatique, impact, modélisation du développement et du rendement, blé dur.

Climate change in Algeria and its impact on durum wheat

Abstract

According to IPCC reports, the Mediterranean basin and particularly the North African area are amongst the most vulnerable regions to climate change. However, the information concerning the North-African zone is very limited and studies on climate change have never been conducted in Algeria up to now. This paper aims at bridging this information gap and initiates a first research on the impact of climate change on durum wheat cropping, the most strategic commodity in the food system and in the national economy of Algeria.

Climate projections for the distant future (2071-2100), obtained from the ARPEGE-Climate model of Météo-France run under the medium A1B SRES scenario, are introduced into a simple agro-meteorological crop model previously validated with field data. Two options for the sowing date are assessed: a dynamical date, chosen within the traditional sowing window by means of a rainfall criterion, or a prescribed date with supplemental irrigation on the same day. Crop development is modelled using thermal time and maximum yield is determined from the accumulation of solar radiation. A water stress index is inferred from a daily water balance model and actual yield is estimated from potential yield corrected by the water stress index. The model also takes into account the occurrence of dry periods during the growing season, which can induce partial or total failure of the crop cycle.

Two stations, representative of two of the three agro-climatic areas where durum wheat is grown, were chosen: Algiers in the central northern region and Bordj Bou Arreridj in the eastern high plains.

Climate change is not similar for both areas, but a tendency toward aridity is clear especially in spring. Future temperature and potential evapotranspiration increase in both regions with a maximum in spring and summer. In Algiers rainfall will decrease throughout the year and mainly in spring and summer. Conversely, summer

precipitation in Bordj Bou Arreridj will increase significantly. In both regions the autumn rains will increase in the future climate, the possibilities of early sowing will be improved, crop cycle will be reduced and harvest will take place earlier. In Algiers, yields tend to decrease in the future climate, whereas in Bordj Bou Arreridj, a dynamical (earlier) sowing will tend to keep yields at their current level.

Key words: Algeria, climate change impact, crop development and yield modelling, durum wheat.

ملخص

التقارير المختلفة لفريق الخبراء الدولي حول تطورات المناخ (GIEC) تظهر ان حوض البحر الأبيض المتوسط، وخاصة منطقة شمال أفريقيا، من بين أكثر المناطق عرضة للتغير المناخي. مع ذلك، المعلومات المتعلقة بهذه المنطقة لا تزال محدودة، ويرجع ذلك أساسا الى عدم توفر البيانات المناخية. ان الدراسات بشأن تغير المناخ وآثاره لم تلمس حتى الآن بعض الأماكن في المنطقة بما في ذلك الجزائر. و هكذا تستهدف دراستنا سد هذا النقص من المعلومات و المبادرة لإجراء البحوث حول هذا الموضوع عن طريق دراسة تأثير تغير المناخ على زراعة القمح الصلب، أكثر السلع إستراتيجية في النظام الغذائي والاقتصاد الوطني.

اعتمادا على توافر البيانات المناخية تم اختيار محطتين للقيام بهذه الدراسة: الجزائر في المنطقة الوسطى وبرج بوعريريج في الهضاب العليا الشرقية. تم استخدام معطيات مناخية مسجلة على مستوى محطات الارصاد الجوية (1978-2007 لمنطقة الجزائر و 1980-2009 لمنطقة وبرج بوعريريج) و توقعات المستقبل البعيد (2071-2100) لنموذج المناخ ARPEGE المنفذة حسب السيناريو المتوسط SRES A1B و التي تم الحصول عليها على مستوى وكالة الأرصاد الجوية الفرنسية، لتشغيل نموذج زراعي بسيط قد قمنا بالتحقق من صحته في بداية عملنا باستعمال معطيات تجريبية.

تم اختبار خيارين للبذر بذر ديناميكي محدد على أساس الفترة التقليدية للبذر و بذر بتاريخ محدد مع توفير ري تكميلي في نفس الموعد. تم تمثيل نمو الزراعة باستعمال الوقت الحراري اما المردود الأقصى فقد تم حسابه بواسطة الإشعاع الشمسي المتراكم. استخرج مؤشر الإجهاد المائي من نموذج توازن الماء وقدر أخيرا المردود الفعلي عن طريق المردود الأقصى المصحح باستخدام مؤشر الإجهاد المائي. إن النموذج يأخذ بعين الاعتبار وقوع فترات جفاف خلال مرحلة النمو و الذي يمكن ان يسبب الفشل الجزئي أو الكلي لدورة المحصول.

تشير النتائج إلى تغيير مناخي غير متماثل في منطقتي الدراسة، ولكن الميل إلى الجفاف واضح وخاصة في فصل الربيع. تبين التوقعات ارتفاع درجات الحرارة و النتج الكامل في المستقبل في كلا المنطقتين مع ارتفاع أقصى الحدود في فصلي الربيع والصيف. في الجزائر يتوقع انخفاض التساقط على مدار العام خاصة في فصل الصيف و على عكس ذلك في برج بوعريريج تشير النتائج إلى زيادة معتبرة في كمية التساقطات الصيفية. تبين الدراسة تحسن في تساقطات فصل الخريف في المناخ المستقبلي مما يؤدي الى تحسن فرص الزراعة المبكرة , بذلك سنتقلص دورة المحصول و يصل الحصاد في وقت مبكر.

في الجزائر، يميل المردود الى الزيادة في المناخ المستقبلي, بينما في برج بوعرييج سيسمح الزرع الديناميكي بالحفاظ على المستوى الحالي للمردود.

الكلمات المفتاح: الجزائر، تأثير تغير المناخ، نموذجة النمو و المردود القمح الصلب.