

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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



جامعة فرحات عباس، سطيف 1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

N°/SNV/2014

MÉMOIRE

Présenté par

Khebbat Zouina

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN AGRONOMIE

Spécialité: Génétique et amélioration des plantes

THÈME

**Etat hydrique du sol et performance d'une collection de variétés
de blé dur**

Soutenue publiquement le/...../2015

DEVANT LE JURY

Président	Fenni Mohamed	Pr	UFA Sétif 1
Directeur	Hafsi Miloud	Pr	UFA Sétif 1
Examineurs	Benmahamed Amar	Pr	UFA Sétif 1
	Mebarkia Abdelkrim	MCA	UFA Sétif 1

REMERCIEMENTS

L'information et la formation ne sont que directives mais le fruit et l'épanouissement en sont la résultante.

Ce travail de thèse a atteint son terme grâce à l'assistance et à la collaboration de nombreuses personnes. Je profite de cette occasion de gratitude et de reconnaissance pour remercier tous ceux qui de loin ou de près ont contribué.

Avant tout, je voudrai exprimer ma reconnaissance et mes sincères remerciements à monsieur le professeur Miloud Hafsi, mon directeur de thèse, qui a tout d'abord accepté la conduite et la direction de ma thèse, par sa rigueur scientifique, par ses conseils et ses encouragements, il m'a toujours aidé à aller de l'avant, veuillez trouver ici l'expression de mon estime et ma considération.

Ma profonde gratitude va à monsieur Fenni Mohamed, professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif, qui a accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie vivement les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, monsieur Benmahamed Amar, professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif et le Docteur Mebarkia Abdelkrim Université Ferhat Abbas Sétif.

Je remercie monsieur Guendouz Ali attaché de recherche à l'INRA de Sétif et monsieur Moumeni Lyes pour leur contribution et le partage de leurs compétences dont j'ai bénéficié.

Mes remerciements s'adressent à ceux qui ont participé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

AAE	Average Absolut error
ABA	Acide abscissique
APSIM	Agricultural Production Systems sIMulator
Bio	Biomasse aérienne.
CC	Capacité au champ
CO ₂	Gaz dioxyde de carbone
d	Indice d'agrément
DSA	Direction des services agricoles.
ET	Evapotranspiration.
ETc	Evapotranspiration potentielle de culture.
ETm	Evapotranspiration maximale.
ETo	Evapotranspiration de référence.
ETP	Evapotranspiration potentielle.
ETR	Evapotranspiration réelle.
FAO	Food and agriculture organization of united nation.
H	Horizon.
ICARDA	International center for agricultural research in the dray areas.
IR	Indice de récolte.
IPCC	Intergouvernemental Panel on Climate Change
IBSNAT	International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
Ks	Coefficient de stress.
LSD	Différence Significative Minimale
NE/m ²	Nombre d'épis par mètre carré
NG/m ²	Nombre de grains par épi
NG/m ²	Nombre de grains par mètre carré
NP/m ²	Nombre de plants par mètre carré
Oi	Valeur observée
PE	Potential Error
PF	Point de flétrissement
PMG	Poids de mille grains

RDT	Rendement grains
RMSE	Rootmean square error
SH	Stress hydrique
SHT	Stress hydrique totale
Si	Valeur simulée

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Phylogénie des blés	5
Figure 2. Le cycle de développement du blé	6
Figure 3. Moyenne de 10 ans (2002-2012) de production du blé dur dans le monde.....	17
Figure 4. Evolution de la production du blé dur en Algérie et à Sétif depuis 1998 jusqu'à 2012.....	18
Figure 5. Températures mensuelles des campagnes 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014.....	33
Figure 6. Précipitations mensuelles des campagnes 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014.....	34
Figure 7. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2010/2011.....	35
Figure 8. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2011/2012.....	35
Figure 9. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2012/2013.....	36
Figure 10. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2013/2014.....	36
Figure 11. Fluctuation de l'humidité pondérale des deux premiers horizons du sol au cours du cycle végétatif.....	37
Figure 12. Changement du rendement grain des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	39
Figure 13. Changement du rendement grain des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	40
Figure 14. Changement du nombre d'épis/m ² des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	41
Figure 15. Changement du nombre d'épis/m ² des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	42
Figure 16. Changement du nombre de grains/m ² des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	43
Figure 17. Changement du nombre de grains/m ² des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	44
Figure 18. Changement de la biomasse des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	45

Figure 19. Changement de la biomasse des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	45
Figure 20. Changement du PMG des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	47
Figure 21. Changement du PMG des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	47
Figure 22. Changement de l'indice de récolte des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.....	48
Figure 23. Changement de l'indice de récolte des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.....	49
Figure 24. L'effet du stress hydrique sur le PMG et sur le rendement durant les quatre saisons.....	61
Figure 25. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m ² de la campagne 2011/2012.....	66
Figure 26. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m ² de la campagne 2012/2013.....	66
Figure 27. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m ² de la campagne 2013/2014.....	67
Figure 28. Relation entre le nombre d'épis /m ² et le nombre de grains/m ² de la campagne 2011/2012.....	67
Figure 29. Relation entre PMG et le la biomasse de la campagne 2013/2014.....	68
Figure 30. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2010/2011.....	70
Figure 31. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2011/2012.....	71
Figure 32. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2012/2013.....	71
Figure 33. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2013/2014.....	72
Figure 34. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2010/2011.....	74
Figure 35. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2011/2012.....	74
Figure 36. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2012/2013.....	74
Figure 37. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2013/2014.....	74
Figure 38. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2010/2011.....	75
Figure 39. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2011/2012.....	75

Figure 40. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2012/2013.....	76
Figure 41. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2013/2014.....	76
Figure 42. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2010/2011.....	77
Figure 43. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2011/2012.....	77
Figure 44. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2012/2013.....	77
Figure 45. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2013/2014.....	77
Figure 46. Relation entre le rendement simulé et observé durant les quatre saisons.....	80
Figure 47. Relation entre la biomasse observée et simulée durant les quatre saisons.....	80
Figure 48. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé durant les quatre saisons.....	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Production mondiale du blé en Tonnes (FAOSTAT, 2012).....	16
Tableau 2. Paramètres utilisés dans l'AquaCrop.....	28
Tableau 3. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2010/2011.....	49
Tableau 4. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2011/2012.....	50
Tableau 5. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2012/2013.....	50
Tableau 6. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2013/2014.....	50
Tableau 7. Résultats de la simulation du bilan hydrique.....	51
Tableau 8. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2010/2011.....	53
Tableau 9. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2011/2012.....	54
Tableau 10. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2012/2013.....	55
Tableau 11. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2013/2014.....	56
Tableau 12. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de la campagne 2010-2011.....	59
Tableau 13. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2011-2012.....	59
Tableau 14. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2012-2013.....	60
Tableau 15. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2013-2014.....	60
Tableau 16. Valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle AquaCrop.....	78

SOMMAIRE

Résumé

INTRODUCTION	1
PARTIE I : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	
1. Historique et origine du blé dur.....	2
2. Biologie et cycle végétatif.....	4
3. Exigences culturales du blé dur.....	8
3.1. Facteurs édaphiques.....	8
3.2. Facteurs climatiques.....	8
3.2.1. Température.....	8
3.2.2. Eau.....	9
3.2.3. Lumière.....	10
4. Le stress hydrique.....	10
5. Mécanismes d'adaptation de la plante au stress hydrique.....	11
5.1. Adaptation phénologique.....	11
5.2. Adaptation morphologique.....	12
5.3. Adaptation physiologique.....	13
6. Importance économique.....	15
6.1. Dans le monde.....	15
6.2. En Algérie.....	16
7. Importance de la modélisation et ses perspectives.....	19
7.1. Problématique et opportunité de l'étude.....	19
7.2. Structures des modèles de culture.....	20
7.2.1. Modèles de culture.....	20
7.2.2. Les structures des modèles de culture.....	21

7.2.3. Les domaines d'utilisation des modèles de culture.....	22
7.3. AcquaCrop.....	23

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

1. Matériels et méthodes.....	26
1.1. Description du site expérimentale.....	26
1.2. Matériel Végétal et outils de simulation.....	26
1.2.1. Matériel végétal.....	26
1.2.2. Modèle AQUACROP.....	27
1.2.2.1. Calibration et validation du modèle.....	27
1.2.2.2. Evaluation du modèle.....	28
1.3. Dispositif expérimental.....	30
2. Mesures et notations.....	31
2.1. Paramètres climatiques.....	31
2.1.1. Température et pluviométrie.....	31
2.1.2. L'humidité du sol.....	31
2.2. Paramètres agronomiques.....	31
2.2.1. Le poids de mille grains (PMG).....	31
2.2.2. Le nombre de grains par m ² (NG/m ²).....	31
2.2.3. Le nombre d'épi par m ² (NE/m ²).....	32
2.2.4. Rendement en grain RDT.....	32
2.2.5. La biomasse aérienne (Bio).....	32
2.2.6. L'indice de récolte (IR ou HI).....	32
3. Analyses statistiques.....	32

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Résultats.....	33
1.1. Température.....	33
1.2. Pluviométrie.....	33
1.3. Humidité du sol.....	36
1.4. Composantes du rendement.....	38
1.4.1. Rendement grain.....	38
1.4.2. Nombre d'épi par m ²	40
1.4.3. Nombre de grains par m ²	42
1.4.4. La biomasse aérienne.....	44
1.4.5. Le poids de mille grains.....	46
1.4.6. L'indice de récolte.....	48
1.5. Résultats du modèle AquaCrop.....	51
1.5.1. Simulation du bilan hydrique.....	51
1.5.1.1. Paramètres de mesures.....	51
1.5.1.2. Phases de stress hydrique selon la phénologie.....	51
a- Stade végétatif.....	51
b- Stade reproductif.....	52
1.5.2. Simulation des composants du rendement par AquaCrop.....	57
1.5.2.1. Rendement grain.....	57
1.5.2.2. Biomasse.....	58
1.5.2.3. Indice de récolte (IR).....	58
1.6. Effet du stress hydrique sur le rendement et le PMG durant les quatre saisons.....	61
2. Discussion des résultats.....	62
2.1. Relation entre le rendement et ses composantes.....	62
2.1.1. Nombre de grains/m ²	62

2.1.2. Nombre d'épis/m ²	63
2.1.3. La biomasse.....	64
2.1.4. Le poids de mille grains.....	65
2.1.5. L'indice de récolte.....	65
2.2. Effet du stress hydrique sur le rendement et ses composantes.....	69
2.3. Simulation par le modèle AquaCrop.....	72
2.3.1. Le rendement.....	72
2.3.2. La biomasse.....	74
2.3.3. L'indice de récolte.....	76
3. Synthèse.....	79
CONCLUSION	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83

ANNEXES

RESUME

Notre étude a visé l'évaluation du comportement et la performance des différents génotypes de blé dur Oued Zenati, Altar, Bousselem, Mexicali durant trois saisons (2010-2013) et Ofanto, Hoggar, Sahel, Beliouni durant la saison 2013/2014. Ce travail présente aussi l'utilisation d'un modèle de culture AquaCrop pour la simulation du rendement, de la biomasse et de l'indice de récolte, ainsi son utilisation permet de déterminer l'évapotranspiration potentielle et réelle afin de calculer le coefficient de stress, il permet aussi de prédire les stades de stress hydrique. L'utilisation de ce type d'outil de simulation permet d'améliorer la compréhension du comportement variétal en conditions de contrainte hydrique et à déterminer les phases de stress avec exactitude et leur impact sur le potentiel de production. Il en résulte que les variétés Mexicali et Altar (variétés introduites) qui ont le meilleur rendement pour les trois campagnes, alors que pour la campagne 2013/2014 c'est la variété Ofanto qui a le meilleur rendement d'une part, d'une autre part le stress hydrique est modéré au stade végétatif pour les quatre variétés durant les campagnes 2010/2011 - 2012/2013, et il est sévère au stade reproductif pour toutes les variétés durant les campagnes 2011/2012 – 2013/2014.

Mots clés : Blé dur, état hydrique du sol, performance, AquaCrop.

ABSTRACT

Our study is based to evaluate the behavior and performance of different wheat genotypes Oued Zenati, Altar, Bousselem, Mexicali for three seasons (2010-2013) and Ofanto, Hoggar, Sahel, Belioni during the 2013/2014 season. This work also shows the use the AquaCrop model to simulate yield, biomass and harvest index, and its use to determine the potential and actual evapotranspiration to calculate the stress factor, it also predicts stages of water stress. The use of this type of simulation tool will improve understanding of the varietal behavior under water stress conditions and help to determine the stress phases accurately and their impact on production potential. As a result, the Mexicali and Altar varieties (varieties introduced) that have the best return for the three campaigns , while for the campaign 2013/2014 Ofanto is the variety that has the best return on the one hand , a other moderate water stress at vegetative stage for the four varieties during the campaign 2010/2011 - 2012/2013 and is severe in reproductive stage for all varieties during the campaign 2011/2012 - 2013/2014 .

Keywords: Durum wheat, soil water status, performance, AquaCrop

ملخص

تهدف دراستنا إلى تقييم سلوك وقدرة اصناف القمح المختلفة Altar, Oued Zenati Bousselem Mexicali، لمدة ثلاثة مواسم (2010-2013) و Ofanto، Hoggar، Sahel، Belioni خلال الموسم 2013/2014. ويظهر هذا العمل أيضا استخدام نموذج AquaCrop من اجل تقدير المردود تقدير الكتلة الحيوية وكذلك تقدير مؤشر الحصاد كما يساعدنا في تحديد نسبة التبخر المحتملة والفعلية وهذا لحساب عامل الإجهاد. هذا النموذج يمكننا من توقع المراحل المجهدة. إن استخدام هذا النوع من النماذج يحسن من فهم سلوك الأصناف تحت ظروف الإجهاد المائي وتساعد في تحديد مراحل الضغط بدقة وتأثيرها على إمكانيات الإنتاج. نتيجة لذلك، الأصناف Altar و Mexicali اللاتي لديهما أفضل عائد للسنوات الثلاث، في حين ل سنة 2013/2014 Ofanto هي التي تحتوي على أفضل عائد من ناحية واحدة، من ناحية اخرى الإجهاد المائي يعتبر معتدل في مرحلة الاخضرار للأصناف الأربعة خلال سنتي 2010/2011 - 2012/2013 و شديد في المرحلة النضج لجميع الأصناف خلال سنتي 2011/2012 - 2013/2014.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب، الوضع المائي للتربة، القدرة.

INTRODUCTION

Le blé constitue la première ressource en alimentation humaine et la principale source de protéines. Ils fournissent également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiple application industrielle. La presque totalité de la nutrition de la population mondiale est fournie par les aliments en grains dont 95% sont produits par les principales cultures céréalières (**Bonjean et Picard, 1990**). La production mondiale de blé se montre à environ 580 millions de tonnes et occupe 215 millions d'hectares (**I.T.C.F., 2002**).

Pour le blé dur (*Triticum durum* Desf.), la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement, qui varient de 10 à 80% selon les années, en région méditerranéenne (Nachit *et al.*, 1998). **Le manque d'eau reste le facteur le plus limitant auquel fait face la culture du blé dur, bien que des études récentes montrent que ce sont plutôt les basses températures hivernales et printanières qui handicapent cette spéculation (Annichiarico *et al.*, 2002, Annichiarico *et al.*, 2005). Tout progrès sensibles des agro-systèmes basés sur cette culture dans l'étage bioclimatique semi-aride semble conditionné par l'amélioration de l'efficience de l'eau (Richards *et al.*, 1997).**

Les blés avec le riz et le maïs comptent parmi les espèces céréalières les plus cultivées et consommées dans le monde entier (Faostat, 2012). Le blé est un composant incontournable de l'alimentation humaine particulièrement pour les populations méditerranéennes.

En conditions méditerranéennes, la recherche d'une plus grande précocité a été, jusqu'ici, le moyen le plus utilisé pour éviter les effets négatifs du déficit hydrique et des hautes températures de fin de cycle sur le remplissage du grain, mais les limitations d'une telle stratégie ont été évoquées par plusieurs auteurs : réduction de la productivité (Laing et Fischer, 1977), risques accrus de gels tardifs (Single et Fletcher, 1979), réduction du développement racinaire (Derera *et al.*, 1969).

La présente étude a pour objectif, l'évaluation du comportement d'une collection de variétés de blé dur ; quatre variétés Oued Zenati, Bousselam, Altar, Mexicali durant trois années successifs et une autre collection composée de quatre variétés pour la dernière année, Hoggar, Sahel, Ofanto et Belliouni d'une part.

D'une autre part, on a utilisé le modèle cultural de la FAO, l'AquaCrop pour simuler la quantité d'eau perdue par transpiration et l'évapotranspiration pour prédire les périodes de stress hydrique et aussi pour simuler la biomasse, le rendement, l'indice de récolte et évaluer ce modèle durant quatre ans successifs de suivi.

PARTIE I : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Historique et origine du blé dur

Le blé est l'une des premières espèces cueillies et cultivées par l'homme depuis plus de 7000 à 10000 ans, dans le croissant fertile, zone couvrant la Palestine, la Syrie, l'Irak et une grande partie de l'Iran (Croston et Williams, 1981). Des restes de blés, diploïdes et tétraploïdes, remontant au VII^{ème} millénaire avant J.C ont été découvertes sur des sites archéologiques au Proche Orient (Harlan, 1975).

Le blé dur est une espèce connue depuis la plus haute antiquité. Elle appartient au groupe tétraploïde du genre *Triticum* qui comprend de nombreuses espèces. Le blé avec le riz (*Oriza L.*) et le Maïs (*Zea mays L.*) constituent la base alimentaire des populations du globe. Ils semblent avoir une origine commune issue d'une même espèce ancestrale qui aurait contenu tous les gènes dispersés chez les trois espèces actuelles (Yves et De Buyser, 2000). Selon Mckee (1968), l'origine génétique du blé dur remonte au croisement entre deux espèces ancestrales *Triticum monococcum* et une graminée sauvage *Aegilops speltaïde*. Le blé dur, *Triticum durum*, appelé ainsi en raison de la dureté de son grain, possède à l'inverse des espèces ancestrales originaires de Syrie et de Palestine $2n= 4x= 28$ chromosomes.

Le nombre chromosomique de base hérité du genre *Triticum monococcum* est désigné par A et celui dérivé de l'*Aegilops* est dénommé B, de sorte que *Triticum durum* a une garniture chromosomique désignée par AB (Figure 1).

L'espèce *Triticum durum* s'est différenciée dans trois centres secondaires différents qui sont le bassin occidental de la Méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient, chaque centre secondaire donna naissance à des groupes de variétés botaniques aux caractéristiques phénologiques, morphologiques et physiologiques particulières (Monneveux, 1991). Cette diversification phénologique a été mise à profit en sélection, notamment dans la recherche de gènes intéressants tels ceux qui contrôlent la résistance aux basses températures, plus présents chez les prôles Européens. Ceux qui contrôlent la durée du cycle (précocité aux stades

épaisseur et maturité), chez les prôles Syriens et Jordaniens et ceux contrôlant la grosseur et la vitrosité du grain chez les prôles Méditerranéens (Monneveux, 1991).

2. Biologie et cycle végétatif

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une monocotylédone, c'est une graminée annuelle d'une hauteur moyenne (Bozzini, 1988). La plante de blé dur comporte un système racinaire, de type fasciculé. Les racines séminales sont produites par la plantule durant la levée, elles sont reliées par des racines adventives qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante (Clarke *et al.*, 2002). Le système aérien est constitué par des talles, tiges cylindriques, dressées, habituellement creuses et subdivisées en entre-nœuds (Clarke *et al.*, 2002). Le chaume (talle) se forme à partir des bourgeons axillaires des nœuds à la base de la tige principale ou brin-maitre. Les feuilles se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille (limbe) se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (oreillettes) (Bozzini, 1988).

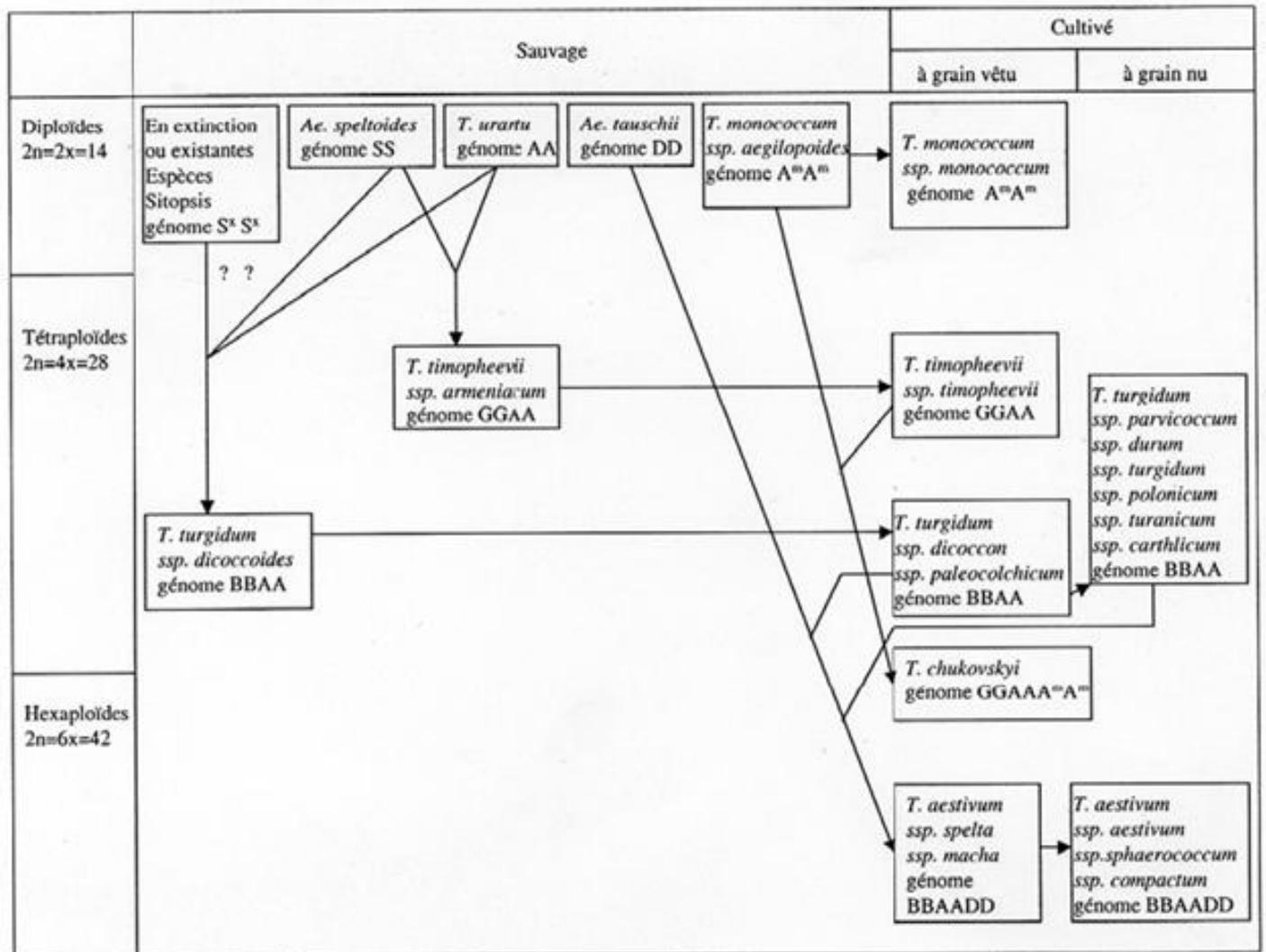


Figure 1. Phylogénie des blés (Feldman, 2011)

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entre-nœuds (Bozzini, 1988). Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur parfaite est renfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure (lemma ou lemme) et la glumelle supérieure (paléa). Chacune compte trois étamines à anthères biloculaires, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux. À maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le caryopse. Chaque graine contient un large endosperme et un embryon aplati, situé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur (Bozzini, 1988).

Le cycle végétatif est subdivisé en deux grandes périodes, végétative et reproductrice (Figure 2). C'est au cours de la période végétative que la plante produit des feuilles et des racines. Cette phase végétative s'étend de la germination à l'ébauche de l'épi (Bozzini, 1988). La germination du grain de blé commence quand il a absorbé environ 25% de son poids d'eau. La racine principale, couverte d'une légère enveloppe ou coléorhize, apparaît de même que le coléoptile recouvrant la gemmule, il perce la couche superficielle du sol, percé à son tour par la première feuille (Grandcourt et Prats, 1970)

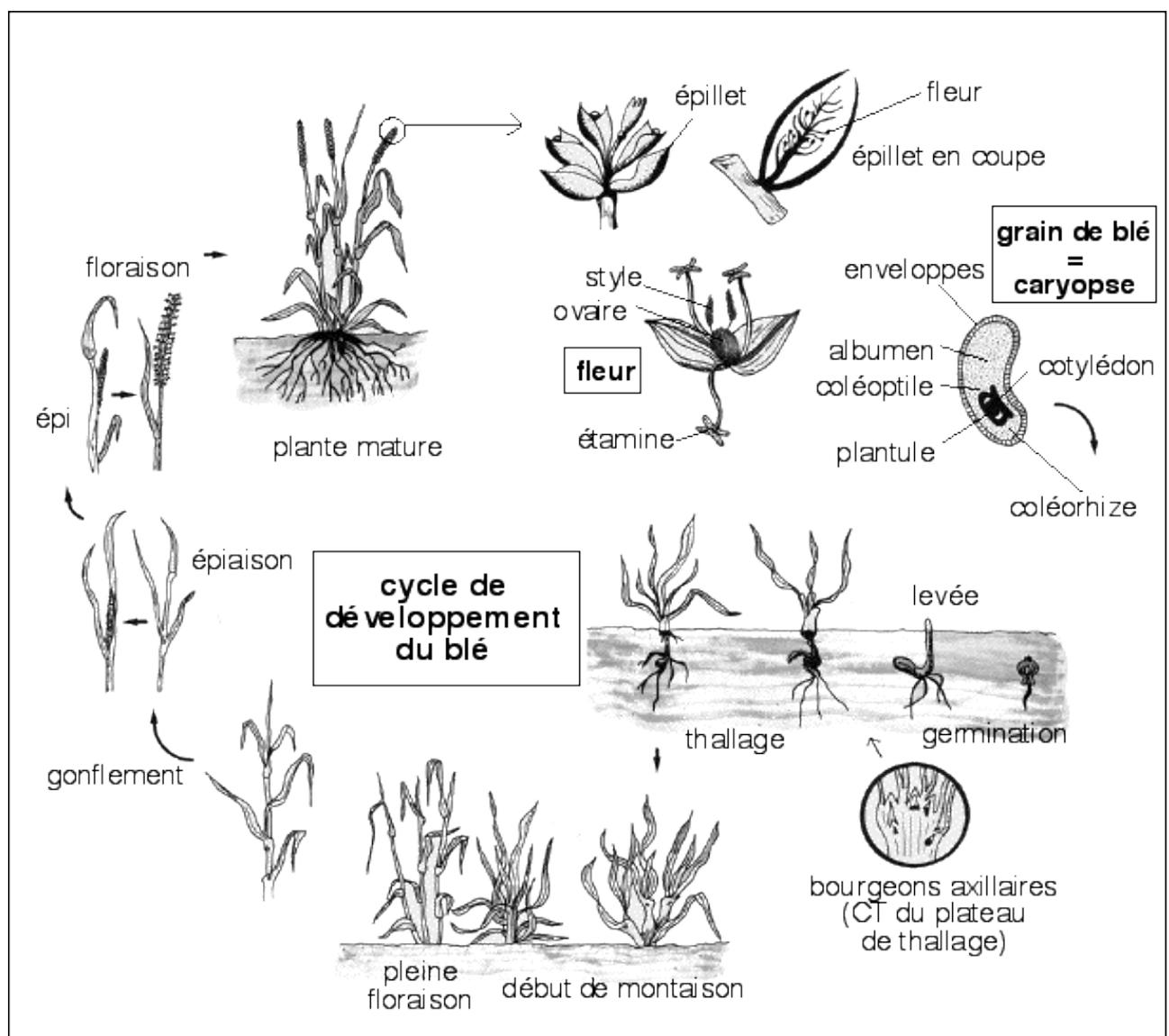


Figure 2. Le cycle de développement du blé (Henry et De Buyser, 2000).

Le tallage est un mode de développement propre aux graminées. Il débute à la troisième feuille, lorsqu'un renflement apparaît à 2cm de la surface du sol, c'est le futur plateau de

tallage. La première talle apparaît généralement à l'aisselle de la première feuille lorsque la plante est au stade 4 feuilles. Par la suite, à chaque nouvelle feuille correspond l'apparition d'une talle. En même temps que se déroule la quatrième feuille, et que pointe la première talle, de nouvelles racines sortent de la base du plateau de tallage : ce sont les racines secondaires, les racines primaires deviennent inactives.

La période reproductrice comprend la formation et la croissance de l'épi. Elle s'étend du stade épi-1cm, montaison, au stade floraison. La montaison débute à la fin du tallage. Elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (Grandcourt et prats, 1971). Cette phase s'achève une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle : c'est le stade gonflement (Bozzini, 1988).

L'épiaison se caractérise par l'émission de l'épi hors de la gaine de la feuille étendard. Les épis sortis de leur gaine, fleurissent, généralement, 4 à 8 jours après l'épiaison. Le nombre de grains par épi est fixé, à ce stade (Bozzini, 1988). C'est au cours de cette période que s'achève la formation des organes floraux et s'effectue la fécondation. La floraison est caractérisée par l'apparition des étamines sur l'épi. Cette phase correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi (Masle, 1980).

Pendant la phase de formation et de maturation du grain, il n'y a plus de croissance des feuilles et des tiges. Le produit de l'activité photosynthétique est entièrement dirigé vers le grain qui grossit, met en place ses enveloppes et accumule des éléments carbonés et azotés. Les glucides proviennent de l'activité photosynthétique des feuilles encore vertes (les dernières sorties) et constituent l'amidon du grain. Les acides aminés proviennent de la migration des

réserves azotées accumulées dans les parties végétatives (feuilles, tiges, épis) et constituent les protéines du grain (Gate *et al.*, 2003). Le grain passe par trois stades consécutifs : laiteux, pâteux et grain mûr. Entre les stades laiteux et pâteux, la quantité d'eau contenue dans le grain est stable; c'est le palier hydrique, phase critique du remplissage du grain, où un dessèchement prématuré de la plante peut bloquer la migration des réserves et provoquer un " échaudage" du grain (Robert *et al.*, 1993).

3. Exigences culturelles du blé dur

3.1. Facteurs édaphiques

Trois caractéristiques font une bonne « terre à blé » :

- une texture fine, limono-argileuse, qui assurera aux racines fasciculées du blé une grande surface de contact donc une bonne nutrition ;
- une structure stable, qui résiste à la dégradation par les pluies d'hiver. Le blé n'y souffrira pas d'asphyxie et la nitrification sera bonne au printemps ;
- une bonne profondeur et une richesse suffisante en colloïdes d'argile et d'humus, capables d'assurer la bonne nutrition nécessaire à de bons rendements.

A l'extrême, le blé peut être cultivé en plein désert à condition qu'il soit irrigué (Soltner, 2005a).

3.2. Facteurs climatiques

3.2.1. Température

Pour une bonne germination, le blé dur a besoin d'un minimum de température de 3 à 5°C. Sa température optimale de développement se situe entre 16 et 25°C. En zone des Hauts-Plateaux, les basses températures qui coïncident avec le stade floraison (gelées printanières) sont à craindre, car elles provoquent la coulure des fleurs et affectent le rendement de la culture. Les hautes températures sèches (vents chauds), coïncidant avec le stade de

remplissage des grains, provoquant l'échaudage, affectant ainsi le rendement et la qualité du grain.

3.2.2. Eau

La culture du blé dur convient dans les zones à pluviométrie comprise entre 400 et 600 mm. Les besoins en eau du blé dur sont plus importants entre les stades de développement-montaison et remplissage des grains (Anonyme, 2006).

La quantité d'eau évaporée par la plante pour l'élaboration d'un gramme de matière sèche est appelée COEFFICIENT DE TRANSPIRATION.

Pour une même plante, ce coefficient varie dans de très grandes proportions. Il est d'autant plus élevé que :

- l'évaporation est intense, donc le climat chaud et sec ;
- l'humidité du sol est forte : en sol très humide, il y a consommation "de luxe" ;
- la solution du sol est pauvre : la fumure et entre autre potassique, en concentrant la solution, économise l'eau absorbée et diminue donc le coefficient de transpiration à cause de la fermeture des stomates.

Vu ces variations, les comparaisons entre plantes ne sont possibles que dans un même milieu (Soltner, 2005b).

La sensibilité du blé dur au stress hydrique est importante du stade 2 nœuds au stade grain laiteux avec une phase cruciale au moment de l'épiaison et de la floraison (Castillon, 1993).

3.2.3. Lumière

Une certaine durée du jour (photopériodisme) est nécessaire pour la réalisation du stade B précédant la montaison. Quant à l'intensité lumineuse et à l'aération, elles agissent directement sur l'intensité de la photosynthèse dont dépendent à la fois la résistance des tiges à la verse et le rendement (Soltner, 2005b).

4. Le stress hydrique

Dans la région méditerranéenne, le stress hydrique est une des principales contraintes de la production (Simane *et al.*, 1993). La notion de stress hydrique a toujours été assimilée à la notion de sécheresse. La sécheresse définit l'état de pénurie hydrique dont souffre la culture (Morizet, 1984). L'effet de stress hydrique sur la croissance et la phénologie du blé dépend du stage végétatif de l'avènement du stress, de la durée, de l'intensité du stress et de la sensibilité du génotype stressé (El Hafid *et al.*, 1998). Le déficit hydrique, après floraison, lorsqu'il est combiné aux fortes températures, entraîne une diminution du poids moyen du grain, suite à l'altération de la vitesse et de la durée de remplissage, provoquant ainsi l'échaudage (Benbelkacem et Kellou, 2001).

La culture du blé dur exige un total pluviométrique au dessus de 450 mm, pour une croissance sans stress hydrique. Une bonne répartition de cette pluviométrie, tout le long du cycle, serait de 350 mm du semis au stade gonflement et 150 mm du stade gonflement à la maturité physiologique (Chenaffi *et al.*, 2006). Le déficit hydrique, de nature intermittente, est une des principales causes des pertes de rendement du blé dur, pouvant aller jusqu'au sinistre total. Il affecte toutes les composantes du rendement, et en particulier le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain (Chenaffi *et al.*, 2006).

Selon Debaeke et ses collaborateurs (1996), le déficit hydrique précoce, au cours de la montaison, réduit le nombre d'épis et le nombre de grains par épi. Le poids moyen du grain, quant à lui, est affecté par le déficit hydrique de la post-floraison, qui accélère la sénescence foliaire et réduit de la durée de remplissage. Abbassenne *et al.*, (1998) mentionnent que, sous conditions pluviale des hautes plaines orientales, la durée de remplissage et par conséquent le poids du grain atteignent rarement leurs valeurs maximales, se traduisant par une baisse de rendement. Le stress hydrique active la dégradation de la chlorophylle et induit la fermeture

des stomates, réduisant l'entrée du CO₂. La réduction de la photosynthèse est liée à la réduction de l'activité photochimique du photosystème II (PSII) (Ykhlef, 2002).

5. Mécanismes d'adaptation de la plante au stress hydrique

La sécheresse est l'un des principaux facteurs limitant les rendements. Le manque d'eau est souvent associé aux stress abiotiques (gels, hautes températures, salinité) (Mekliche et al., 2003). La résistance à la sécheresse est due à plusieurs facteurs d'ordre phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation (esquive, évitement et tolérance) (Turner, 1979; Nachit et Ketata, 1986). Chaque espèce possède un éventail de caractères dits adaptatifs car ils contribuent au maintien de l'équilibre entre les besoins des organismes et les conditions du milieu (Chaker et Brinis, 2005). Selon (Rejeb et Ben Salem, 1993) les variétés de céréales résistantes au déficit hydrique se caractérisent par une stratégie regroupant en même temps un ensemble de mécanismes d'adaptation.

5.1. Adaptation phénologique

La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive de stress de fin de cycle chez le blé dur. L'adoption de variétés à cycle relativement court est nécessaire dans les régions arides à semi-arides compte tenu de la distribution temporelle des précipitations (Mekhlouf *et al.*, 2006a). L'esquive est une des stratégies d'amélioration variétale qui consiste à raccourcir le cycle d'une variété afin de lui permettre de parvenir jusqu'à la maturité durant une période relativement moins stressante. On réduit alors le risque d'une forte perte de rendement, en échange d'une réduction du potentiel, stratégie dite conservatrice (Monneveux, 1991 ; Amigues *et al.*, 2006).

La mise en place d'une stratégie d'esquive, selon Levitt (1980), consiste à inscrire le cycle de la culture à l'intérieur d'une période au cours de laquelle les potentiels initiaux (sol) et finaux (atmosphère) du continuum sol-plante-atmosphère sont à l'optimum et permettent

d'éviter une baisse du potentiel hydrique de la plante. Ceci est réalisé soit par la voie des techniques culturales (choix de la date de semis) ou bien par la voie génétique (sélection de variétés précoces). Fischer et Maurer (1978) mentionnent que chaque jour de précocité confère un gain de rendement compris entre 30 et 85 kg/ha. Toutefois la précocité d'épiaison s'accompagne d'une réduction du potentiel de production par diminution des sites de remplissage. De plus les variétés précoces ont de faibles potentiels en année favorable et courent le risque d'être pénalisées par le gel tardif (Mekhlouf *et al.*, 2006b).

5.2. Adaptation morphologique

La stratégie de l'évitement permet à la plante de maintenir un potentiel hydrique élevé. L'évitement consiste à empêcher que la plante, soumise à des conditions hydriques défavorables, de subir un stress hydrique sévère. Ceci est obtenu par une réduction de la transpiration s'effectuant par la cuticule et les stomates incomplètement fermés (Belhassen *et al.*, 1995). Ce type d'adaptation réduit le risque de perte de rendement, mais il a un coût en termes de rendement maximum (Amigues *et al.*, 2006). Slama et ses collaborateurs (2005) mentionnent que l'évitement du déficit hydrique peut se traduire par des modifications morphologiques qui augmentent l'absorption d'eau. Le développement du système racinaire est un facteur important de la résistance au stress hydrique (Passioura, 2004).

Les cultivars de blé à système racinaire extensif exploitent un grand volume de sol, absorbent une grande quantité d'eau, donnant un haut rendement. Les caractéristiques du système racinaire ne jouent leur rôle dans la résistance à la sécheresse que si les racines sont bien développées, avant l'avènement du déficit hydrique (Rebetzke *et al.*, 2007). La réduction de la surface foliaire et du nombre de talles tendent à minimiser les pertes en eau en réduisant la transpiration (Slama *et al.*, 2005).

L'enroulement du limbe foliaire diminue de la surface foliaire réceptrice de l'énergie lumineuse et permet à la plante de réduire sa transpiration. Toutefois, ce phénomène s'accompagne aussi d'une réduction de la photosynthèse, il n'est nécessaire qu'en présence de déficit hydrique sévère (Slama *et al.*, 2005). La glaucescence, la pilosité des feuilles, la couleur des feuilles ou le ratio des chlorophylles a et b et la température de la feuille sont des caractéristiques indicatrices de la résistance aux stress abiotiques. Les barbes améliorent le rendement en conditions de sécheresse par augmentation de la surface photosynthétique de l'épi (Slama *et al.*, 2005).

5.3. Adaptation physiologique

La stratégie de la tolérance est mise en œuvre par les plantes grâce à l'abaissement du potentiel hydrique qui maintient la turgescence (Sorrells *et al.*, 2000). Les mécanismes intervenant dans la tolérance assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire. La réduction des pertes en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress. Cette diminution de la transpiration engendre une réduction de la photosynthèse. Les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le stress présentent une efficacité de l'utilisation de l'eau élevée et une plus grande capacité de survie (Araus *et al.*, 2002).

L'adaptation à des milieux aux régimes hydrique et thermique variables est en partie associée à l'ajustement osmotique (Richards *et al.*, 1997). L'ajustement osmotique constitue le processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique (Zhang *et al.*, 1999). L'ajustement osmotique est réalisé grâce à une accumulation des solutés (principalement vacuolaire) conduisant à un maintien du potentiel de turgescence. Les solutés responsables de la régulation osmotique sont essentiellement des acides organiques, des acides

aminés (proline, glycine-bétaine), des sucres solubles et certains constituants inorganiques (Richards *et al.*, 1997).

L'ABA joue un rôle de médiateur dans les réponses au stress hydrique, principalement dans les mouvements stomatiques. Des travaux effectués au niveau moléculaire sur les effets de l'ABA et du stress hydrique confortent l'hypothèse selon laquelle cette hormone joue un rôle clé dans la réponse au stress hydrique (Cattivelli *et al.*, 1995). L'ABA intervient dans la stimulation de la croissance racinaire, la réduction de la surface foliaire, la diminution de la radiation absorbée, l'abscission des feuilles et la fermeture stomatique (Cattivelli *et al.*, 1995).

Ces mécanismes ont des effets bénéfiques sur le plan de l'économie en eau, mais accélèrent la sénescence et inhibent la photosynthèse et la croissance, ce qui contribue à réduire le rendement (EL Jaafari *et al.*, 1995). L'identification de géotypes capables de maintenir une photosynthèse active sous contrainte hydrique repose sur une réduction des mécanismes contraignants induits par l'acide abscissique (ABA).

L'efficacité d'utilisation de l'eau, définie comme la production de la biomasse par unité d'eau consommée, est un important caractère de tolérance à la sécheresse (Richards *et al.*, 2002). L'efficacité de l'utilisation de l'eau dépend toutefois non seulement des caractéristiques biologiques propres à l'espèce, mais aussi de la durée de la saison de culture, de la fertilisation, du rapport partie racinaire sur partie aérienne et de facteurs climatiques tels que le déficit de saturation de l'air (Angus et Herwaarden, 2001).

L'efficacité d'utilisation de l'eau est un indicateur de l'adaptation des plantes à la sécheresse. Pour les plantes C3, les processus foliaires qui déterminent l'efficacité d'utilisation de l'eau, sont également ceux qui contrôlent la discrimination isotopique du carbone (Δ), lors de l'assimilation photosynthétique du CO₂. La mesure de Δ est donc une mesure indirecte de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Araus *et al.*, 2003). Les plantes fixant le plus de carbone par unité d'eau transpirée ont une concentration interne de CO₂ faible, une valeur de Δ faible et une composition isotopique riche en ¹³C (Δ peu négative) (Merah *et al.*, 1999). L'altération de

l'état physiologique des plantes, causée par le stress, se reflète rapidement au niveau des signaux lumineux et thermique émis par les feuilles. Des mesures *in vivo*, basées sur la fluorescence de la chlorophylle sont utilisées pour estimer la tolérance du stress hydrique, thermique et lumineux (Havaux *et al.*, 1988).

6. Importance économique

6.1. Dans le monde

Le blé vient en tête de classement des cultures stratégiques car il constitue une source alimentaire pour plus de 35% de la population humaine (Evans, 1993).

La production mondiale de blé pour la campagne 2011-12 a été de 672 millions de tonnes (t) sur une superficie de 215 millions d'hectares (ha) semés ; soit un rendement de 3.1 t/ha selon le département américain de l'agriculture en juillet 2012 (USDA). La Chine, l'Inde et les Etat Unis d'Amérique sont les plus grands producteurs, représentant à eux seuls, plus de 40% de la production mondiale de blé pour l'année 2012 (tableau 1).

Le blé dur (*Triticum durum* Desf., $2n = 4x = 28$, génome AABB) occupe 8 à 10% des surfaces emblavées en blés et fournis 30 % de la production mondiale de céréales et 20 % de la ration alimentaire consommée par la population mondiale selon le BGRI.

Tableau 1. Production mondiale du blé en Tonnes (FAOSTAT, 2012).

Classement	Pays Producteurs de Blé en Tonnes (source: FAO)	2012
1	Chine, continentale	120 580 000
2	Inde	94 880 000
3	Etats-Unis d'Amérique	61 755 240
4	France	40 300 800
5	Fédération de Russie	37 719 640
6	Australie	29 905 009
7	Canada	27 012 900
8	Pakistan	23 473 000
9	Allemagne	22 432 000
10	Turquie	20 100 000
11	Ukraine	15 762 600
12	Iran (République islamique)	13 800 000
13	Royaume uni	13 261 000
14	Kazakhstan	9 841 100
15	Egypte	8 795 483
16	Pologne	8 607 600
17	Argentine	8 197 855
18	Italie	7 767 300
19	Ouzbékistan	6 512 400
20	Romanie	5 297 748
21	Afghanistan	5 050 000
22	Espagne	4 650 300
23	Danemark	4 525 100
24	Bulgarie	4 455 100
25	Brésil	4 418 388

6.2. En Algérie

La superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara, la superficie agricole ne représente que 3% de la totalité. La surface agricole utile est de 7,14 millions d'hectares, dont près de la moitié est laissée en jachère. Les cultures herbacées couvrent 3,8 millions d'hectares. La céréaliculture constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares, soit 50% des terres labourées (MADR, 2007).

Le blé dur est une culture traditionnelle dont l'origine remonte selon Laumont et Erroux (1961) à la venue des arabes. Cette spéculation se partageait avec l'orge, l'essentiel des emblavements alors que le blé tendre s'est développé après l'indépendance. La superficie

occupée par le blé dur est de 1 457 913 hectares, en moyenne pour la période 1996/97-2003/2004. L'importance des superficies occupées par les blés, comparativement à celle de l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'état. Ces prix sont de 4500, 3500 et 2500 DA le quintal respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge.

Une moyenne de 10 ans de production de blé depuis 2002 jusqu'à 2012, classe l'Algérie avant la Tunisie et après le Maroc soit 2.5 millions qx, 1.4 millions qx et 4.5 millions qx respectivement. En revanche, c'est la France qui possède la meilleure production (35million qx) ensuite la Turquie puis l'Egypte et l'Italie en même position (figure 3). Le taux faible de rendement est dû principalement aux contraintes climatiques et principalement le stress hydrique qui est un facteur limitant pour la plante.

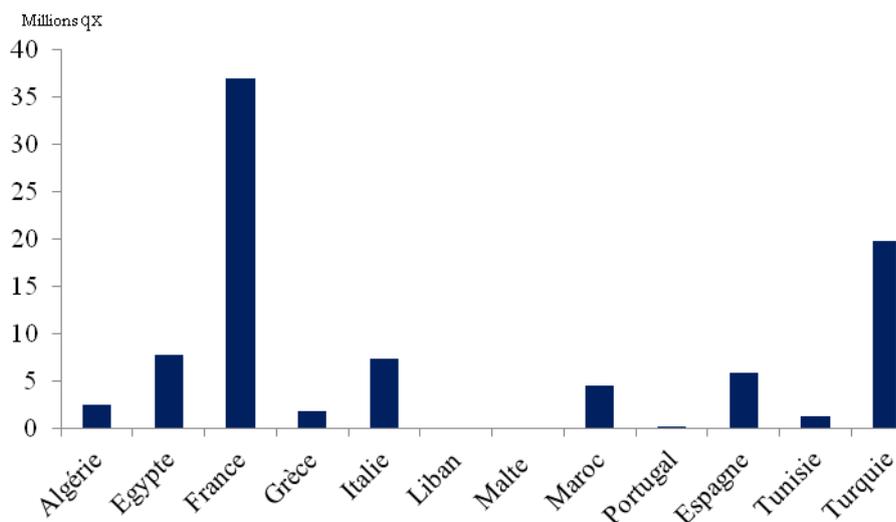


Figure 3. Moyenne de 10 ans (2002-2012) de production du blé dur dans le monde.

L'Algérie a connue des fluctuations de rendement de blé, en 1998 une production de 15 millions qx a été atteinte alors que pour l'année 1999, la production a chuté considérablement et n'a atteint que 1 million qx, sachant que cette période a été caractérisée par une sécheresse sévère, mais depuis la production nationale s'est améliorée surtout pour les années 2009 et 2012 (24 et 25 millions qx/ha respectivement), (figure 4).

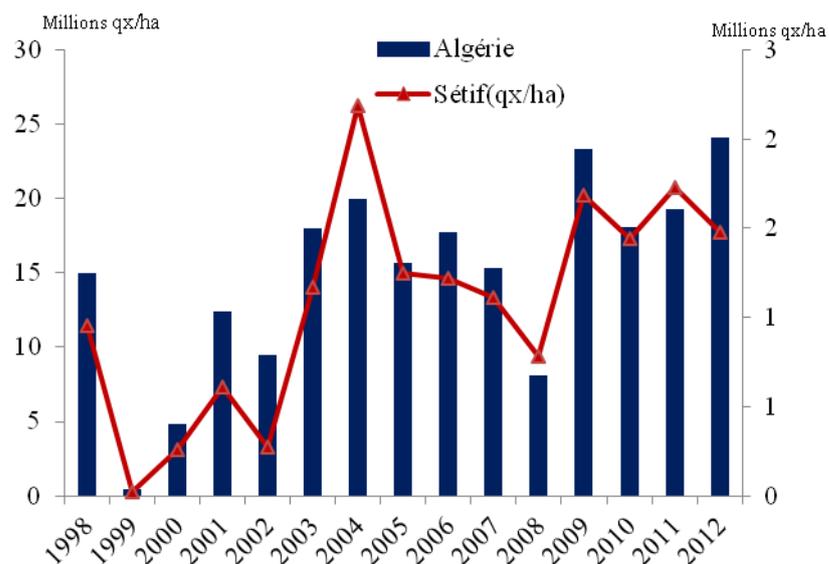


Figure 4. Evolution de la production du blé dur en Algérie et à Sétif depuis 1998 jusqu'à 2012, Source DSA de Sétif.

La culture du blé dur demeure encore difficile à maîtriser tant que celle-ci reste confrontée et soumise à plusieurs contraintes (aléas climatiques et faible maîtrise de l'itinéraire technique). Cette situation engendre une production faible et variable qui ne couvre que 30 à 35 % des besoins.

7. Importance de la modélisation et ses perspectives

7.1. Problématique et opportunité de l'étude

Selon une simulation réalisée par un modèle conçu par *IPCC* (2001) les projections indiquent que les quantités d'eau relativement en zone méditerranéenne diminueront sévèrement à cause des futurs changements de climat corrélés à leur tour à la sécheresse et la désertification.

La sécheresse est probablement le facteur le plus important qui limite la production agricole dans le monde (Jones and Corlett, 1992), c'est un événement naturel et une composante essentielle du climat de chaque région du monde. En plus, ce qu'engendre cet aléa de rareté en ressources hydriques souterraines agissant sur la vie des végétaux, des animaux et sur les systèmes de production des agro éleveurs. Près de 60% des régions arides et semi-arides du monde concernent des pays en voie de développement (Parr *et al.*, 1990), où la production agricole est dans sa quasi totalité dépendante de la pluviométrie. La solution à une telle situation s'avère ardue et compliquée d'où la multiplication des efforts des Etats et des organisations régionales spécialisées dans le diagnostic des systèmes complexes : social, économique, politique et technique ; d'où les contributions à améliorer des productions végétales par le biais des sélections des cultivars utilisant efficacement l'eau, cette eau devenant très demandée soit en cultures pluviales ou irriguées à cause de la croissance démographique, faisant appel à des stratégies de développement des cultures utilisant efficacement l'eau (Li and Yul, 2007).

Depuis quelques années, l'outil informatique conférait une forte aptitude de traitement de données, l'étude des comportements à travers les simulations ouvre des horizons très prometteurs dans la compréhension des phénomènes physiologiques et les tendances du changement climatique universel. Aujourd'hui, l'utilisation des modèles de cultures est

devenue une orientation incontournable relativement à plusieurs cultures dans les endroits potentiels de production.

7.2. Structures des modèles de culture

7.2.1. Modèles de culture

Depuis les premiers essais de modélisation de Wit, (1965) ; *in* Bonhomme, (1997), les modèles de culture se sont largement répandus touchant une grande partie des cultures et offrant un outil de réflexion sur les relations entre les cultures et leurs environnements.

Ces modèles synthétisent, avec des degrés de complexité, les connaissances acquises sur les mécanismes de croissance et l'élaboration du rendement. Ils rendent compte aussi des effets des principaux facteurs du milieu (l'état hydrique du sol, la température, le rayonnement, le type de sol et la fertilité du sol) sur les mécanismes sus cités.

Les modèles constituent une synthèse des connaissances acquises sur les cultures et le fonctionnement du système sol – plante et environnement à travers des relations empiriques qui rendent compte de ces relations. Ainsi, ils constituent des outils d'analyse et de prévision des effets et des modifications appliquées à ce système (Boote *et al.*, 1996).

Bouman et ses collaborateurs (1996) font le classement de trois groupes majeurs de modèles :

1- le groupe de modèles américains (IBSNAT) *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer* (Uehara and Tsuji, 1993) ce projet qui a produit la fameuse famille des modèles CERES.

2- le groupe de modèles australiens qui a développé le simulateur de système de production agricole (APSIM) (*The Agricultural Production system SIMulator*) (McCown *et al.*, 1995).

3- le groupe de modèles hollandais qui a développé une famille décrite par Van Ittersum ses collaborateurs (2003).

Ces dernières années, une série de nouveaux modèles est apparue et utilisée d'une manière croissante tel que CropSyst (Stöckle and Nelson, 1999; Stöckle *et al.*, 2003), STICS développé par l'INRA 1996.

Dans notre étude, nous essayons de tester un modèle informatique « **Acquacrop** ».

L'intérêt de ces modèles est lié à leurs possibilités de représenter quantitativement, l'action combinée et dynamique des différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement de l'ensemble de la culture.

Les modèles de culture, représentent selon la démarche analytique le fonctionnement du système sol-plante-milieu dans son cadre physique et technique. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques telles que le rendement, la date de récolte, la biomasse aérienne, l'indice de récolte, la consommation en eau, en azote, ou l'impact environnemental des techniques culturales sur le système (les rotations).

Ces grandeurs agronomiques sont estimées à partir des calculs de flux de matière ou d'informations entre les différents compartiments du système.

La complexité des relations existantes dans ce système ne peut être prise en compte dans son ensemble. Les modèles de culture reposent donc sur une hiérarchisation des processus en fonction des variables de sortie visées et des conditions de leur utilisation. Ils sont donc une représentation simplifiée du système en interaction avec les pratiques agricoles.

7.2.2. Les structures des modèles de culture

Les modèles sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sus cité de manière dynamique, dont l'unité de temps est souvent le jour, c'est-à-dire qu'ils décrivent l'état du système chaque jour (Whisler *et al.*, 1986). Ils comprennent un ensemble de variables d'entrée (l'état initial du système au début de la simulation, le climat journalier, et les techniques culturales), de paramètres (coefficients culturaux et mathématiques), de variables d'état (les variables décrivant le système chaque jour, par exemple la biomasse aérienne de la culture) et de variables de sortie (à la fin ou en cours de la simulation) comme le rendement à la récolte.

Selon la nature des variables d'état décrites dans le modèle et les équations mathématiques simulant leur évolution, on distingue les modèles de type « mécaniste » et les modèles de type

« empirique » (Monteith, 1996 ; Passioura, 1996 ; Whisler *et al.*, 1986).

1- Les modèles de type mécaniste décrivent et quantifient chaque processus, sur des bases physiques ou physiologiques, c'est-à-dire que les équations décrivent finement les processus tels que la respiration, la croissance et le développement de chaque organe.

2- Les modèles de type « empirique », les relations décrivant ces processus sont une simplification des relations complexes existant au sein du système. Il s'agit par exemple de simples régressions linéaires entre deux variables d'état.

7.2.3. Les domaines d'utilisation des modèles de culture

Les modèles de culture rencontrée dans la bibliographie consistent à utiliser les variables simulées comme un outil de prédiction de la stabilité des génotypes pour des variables d'intérêt. Ainsi, Mavromatis ses collaborateurs (2001) dans une étude sur différents génotypes de soja ont montré qu'il était possible, à l'aide d'un modèle de culture, de reproduire non seulement l'effet de l'interaction entre des caractéristiques génotypiques et l'environnement, mais de classer correctement les différents génotypes sur les environnements testés et de mesurer l'interaction de façon similaire au réel.

L'effet des caractéristiques variétales sur la production a été récemment proposé par certains modélisateurs comme une piste de travail intéressante, afin d'identifier les facteurs d'adaptabilité pour le rendement ou pour toute autre composante d'intérêt (Saulescu and Kronstad, 1995 ; Shorter *et al.*, 1991).

Cependant l'utilisation d'un modèle de culture avec un outil de sélection permet d'étudier l'effet de gènes associés à des caractères phénotypiques sur des caractères d'intérêt tels que le rendement, sous l'influence de l'environnement (Chapman *et al.*, 2003).

7.3. AquaCrop

AquaCrop est un modèle informatique mis au point par la division des terres et des eaux de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Cette dernière a

élaboré AquaCrop dans un effort pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la production alimentaire (Araya *et al.*, 2010).

Les fonctions d'AquaCrop comprennent la comparaison entre les rendements observés et réels (FAO, 2011). Dans l'AquaCrop, la transpiration est calculée, et avec l'utilisation de paramètres propres à chaque culture, la biomasse est calculée (Steduto *et al.*, 2009). Le modèle peut être utilisé pour générer des prévisions de rendements et d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau des cultures en interaction avec les changements climatiques projetés (Araya *et al.*, 2010).

AquaCrop utilise relativement un petit nombre de paramètres qui peuvent être séparés en quatre catégories: le climat, la culture, la gestion et le sol (Raes *et al.*, 2009).

Le nouveau modèle de la FAO sur la productivité en eau des cultures - AquaCrop - simule la réponse en terme de rendements des cultures herbacées à l'apport en eau (Steduto *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2009). Ce modèle est particulièrement adapté pour améliorer les conditions où l'eau est un facteur limitant de la production agricole. Il a été conçu pour atteindre un équilibre optimal entre simplicité, précision et robustesse, tout en minimisant le nombre de variables et de paramètres d'entrée, explicites et intuitifs. Il est destiné aux praticiens, ceux qui travaillent pour les services de vulgarisation, les agences gouvernementales, les ONG, et les divers types d'associations d'agriculteurs. Il est également intéressant pour les scientifiques et à des fins pédagogiques. L'AquaCrop a été conçu pour un large éventail d'applications, y compris la prévision de rendement dans les scénarios de changement climatique. Il se distingue des autres modèles existants dans la littérature, car son architecture réduit la complexité de la croissance des cultures et du rendement en ciblant les processus de base. Il adopte un critère de simplification qui permet un équilibre malgré les incertitudes des différents algorithmes et qui évite les sophistications inutiles. En fait, le moteur de croissance de l'AquaCrop est mû par l'eau, puisque c'est la transpiration qui est calculée d'abord puis traduite en utilisant un paramètre de conservation spécifique aux plantes : la productivité de l'eau utilisée de la

biomasse, normalisée pour la demande d'évaporation de l'atmosphère et la concentration de l'air en CO₂. La normalisation vise à rendre applicable AquaCrop à différents endroits et saisons. Le modèle utilise la couverture du sol au lieu de l'indice foliaire (LAI) comme base de calcul de la transpiration et pour séparer l'évaporation du sol de la transpiration. Le rendement des cultures est calculé comme un produit de l'indice de biomasse et de l'indice de récolte. Hormis le rendement, il n'y a pas de partage de la biomasse entre les différents organes.

La réponse des cultures au déficit en eau est simulée avec quatre modificateurs qui sont des fonctions de la fraction d'eau du sol disponible modulée par la demande en évaporation; celle-ci est basée sur la sensibilité différentielle au stress hydrique de quatre processus clés des plantes: l'expansion de la canopée, le contrôle de la transpiration stomatique, la sénescence du couvert, et l'IR.

Après son lancement dans le domaine public en Janvier 2009, AquaCrop a été utilisé pour simuler les différentes cultures et les conditions de gestion de l'agriculture dans plusieurs régions du monde permettant des tests indépendants de la performance du modèle.

En particulier, AquaCrop a été utilisé pour simuler: le maïs irrigué et le maïs avec déficit en eau (Heng *et al.*, 2009.); le coton irrigué en continu et celui irrigué en supplémentaire (Farahani *et al.*, 2009; García-Vila *et al.*, 2009.); le degré de réponse du rendement de la quinoa à l'eau (Gaerts *et al.*, 2009, 2010.), la croissance du tournesol selon différents régimes d'apport en eau et comparé à d'autres modèles (Todorovic *et al.*, 2009.), la biomasse et le rendement de l'orge irriguée ou en régime déficitaire (Araya *et al.*, 2010); le degré de réponse du rendement d'Eragrostis tef à l'eau (Araya *et al.*, 2010). Les conclusions générales sur les performances d'AquaCrop confirment l'idée d'équilibre optimal entre simplicité, de précision et de robustesse, et l'applicabilité du modèle pour une large gamme d'expérimentations sur le design (sur la densité des plantes, le calendrier cultural, les régimes d'apport en eau variables, l'analyse des impacts du changement climatique, à la stratégie et tactique des enquêtes de

gestion, etc.) Les utilisateurs ont apprécié la transparence des algorithmes, l'utilisation d'un nombre relativement restreint de variables et de paramètres d'entrée, et la convivialité du logiciel pour l'utilisateur. Dans tous les cas, la performance de l'AquaCrop a été jugée très positive et même dans certains cas mieux que d'autres modèles sur les cultures plus complexes. Récemment, l'AquaCrop a été choisie pour être testée dans un grand projet nommé "Le projet sur la comparaison de modèles d'amélioration de l'Agriculture» (AgMIP, 2011).

La réponse du rendement à l'eau décrit la relation entre le rendement de la culture et le stress hydrique, en raison de l'insuffisance à fournir de l'eau par les précipitations ou l'irrigation durant la période de croissance (Doorenbos et Kassam. 1979)

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

1. Matériels et méthodes

1.1. Description du site expérimentale

L'expérimentation a été réalisée durant les campagnes agricoles : 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014 au niveau des parcelles expérimentales de l'institut national de la recherche agronomique d'Algérie (INRAA) de Sétif ($36^{\circ} 9'26.30''N$, $5^{\circ}22'17.78''E$), sur une altitude de 970m.

Le climat est de type semi aride (400mm/an) caractérisé par des vents secs et chauds.

Le sol est de type limoneux, le précédent cultural est une jachère travaillée, le lit de semence a été préparé par le passage d'une herse juste avant le semis.

On a pratiqué un désherbage manuel le 19/03/2014 et chimique le 08-04-2014 par le désherbant GranStar 75DF.

1.2. Matériel Végétal et outils de simulation

1.2.1. Matériel végétal

La collection de blé dur testée comporte quatre variétés pour les trois campagnes 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 qui sont Oued Zenati (locale), Altar (introduite), Mexicali (introduite) et Bousselam (améliorée). Pour la campagne 2013-2014 on a choisi une autre collection aussi comporte quatre variétés qui sont Hoggar, Belliouni (locale), Ofanto (introduite)et Sahel.

1.2.2. Modèle AQUACROP

1.2.2.1. Calibration et validation du modèle

Avant de réaliser des simulations, nous avons effectué une calibration d'AquaCrop. Calibrer le modèle consiste à chercher le jeu de paramètres qui permet de minimiser l'écart entre état simulé par le modèle et état mesuré, en supposant que le jeu d'équation est exact. Concernant la calibration du modèle (AquaCrop v4.0), la valeur retenue pour chaque paramètre est celle qui permet la meilleure prévision, la profondeur maximale du sol retenue est celle qui permet la meilleure prévision de l'utilisation de l'eau du sol.

Valider le modèle consiste à vérifier la bonne prédiction des variables d'état du modèle sur un jeu de données (Delécolle *et al.*, 1996), l'évaluation est réalisée sur le critère biomasse aérienne de la culture, l'indice de récolte et le rendement grain.

Nous avons utilisé principalement la "validation répliquative" qui se base sur une comparaison entre les simulations du modèle et les données expérimentales utilisées pour la calibration (Delécolle *et al.*, 1996). Elle ne permet en aucun cas de caractériser la qualité prédictive du modèle, lorsqu'on utilise le modèle pour des conditions de milieu différentes de celles de la calibration.

La période de simulation débute le 30 novembre pour les années 2010 et 2011, le 7 décembre 2012, le 24 novembre 2013 et se termine selon le cycle de la variété. La calibration a porté sur les variables d'entrée relatives au sol et à la culture. Pour chacun des paramètres, la valeur retenue est celle qui minimise l'erreur commise. Les paramètres et réglages retenus de la calibration sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2. Paramètres utilisés dans l'AquaCrop

Paramètres	Stress hydrique et sols
Culture	Canopy expansion
Développement	Ferméture des stomates
Type de plantation	Stress d'aération
Densité des plants	Stress salin
Profondeur d'enracinement maximale	Biomasse produite
Température	
Température minimale	
Température maximale	

1.2.2.2. Evaluation du modèle

La performance du model a été évaluée par l'utilisation des paramètres statistiques suivants:

***AAE** (Average Absolut eerror) erreur absolue moyenne entre données simulées et observées, se calcule par l'équation :

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{N}$$

***RMSE** (rootmean square error) la racine de l'erreur quadratique moyenne.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{N}}$$

- L'RMSE est l'un des indicateurs statistiques les plus couramment utilisés (Jacovides et Kontoyiannis, 1995) et mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions et les observations. Elle varie de 0 à l'infini positif, avec la première montrant une bonne indication et la deuxième, une mauvaise performance du modèle. Un gros avantage de l'erreur quadratique moyenne, c'est qu'il résume la différence moyenne dans les unités de S et O. Cela ne montre pas de distinction entre la sur- et sous-estimation.

Un inconvénient de RMSE est le fait que les erreurs résiduelles sont calculées comme des valeurs au carré, ce qui a pour conséquence que des valeurs, plus élevées dans une série chronologique, sont données avec un poids plus grand par rapport à des valeurs inférieures (Légats et McCabe, 1999) et que RMSE est trop sensible aux valeurs extrêmes ou des valeurs

aberrantes (Moriassi *et al.*, 2007). Il s'agit en fait d'une faiblesse de tous les indicateurs statistiques où la variance résiduelle est carrée, y compris les objectifs EF et de Willmott (d) dont il est question ci-dessous.

d (Willmott's index of agreement)

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

- L'indice d'agrément (*d*) développé par Willmott cherche à améliorer la sensibilité et l'efficacité des corrélations entre les prédictions (P) et les observations (O) pour la validation du modèle. L'indice d'agrément varie entre 0 (mauvais) et 1 (parfait) et s'interprète comme le coefficient de détermination, R^2 . Cet indice est représenté par le ratio entre le Mean Square Error (*MSE*) et le Potential Error (*PE*). *PE* est la somme des différences au carré entre les observations et les prédictions et représente la plus grande valeur qui peut être obtenue pour chaque paire modèle-observation. L'indice d'agrément est très sensible aux valeurs extrêmes et permet ainsi d'évaluer les prédictions en fonction des écarts importants et non uniquement de la moyenne.

Un des inconvénients de l'indice d'agrément est que les valeurs relativement élevées peuvent être obtenues (plus de 0,65), même si le modèle fonctionne mal, et que malgré les intentions de Willmott (1982), (*d*) n'est pas encore très sensible aux systémiques sur ou sous-estimations (Krause *et al.*, 2005).

Où :

S_i et O_i sont les valeurs simulées et observées (mesurées), qui sont prises à la fin de la saison, N est le nombre d'observation, \bar{O}_i et \bar{S}_i sont les moyennes des valeurs de O_i et S_i .

ETo calculator, version 3.2 de la FAO a été utilisé pour calculer l'évapotranspiration de référence avec l'équation de la FAO (Penman-Monteith équation), ETo Calculator, crée les

fichiers de l'évapotranspiration (ETo), la température et le CO₂, qui sont utilisés par AquaCrop pour les modélisations. Les données météorologiques utilisées sont :

Les températures journalières maximales et minimales (°C), humidité relative de l'air (%), vitesse du vent (m/s), et la durée de l'insolation (h/jour).

1.3. Dispositif expérimental

L'essai est conçu selon un dispositif en blocs complètement aléatoire. Chaque génotype est répété trois fois. La parcelle élémentaire comporte 2 lignes de 2m pour chaque variété, avec un espace entre les lignes de 20 cm et 1 m entre les blocs, la densité de semis est de 300 grains/m².

Le semis a été mis en place pour la campagne :

*2010-2011 : 30/11/2010 ;

*2011-2012 : 30/11/2011 ;

*2012/2013 : 07/12/2012 ;

*2013/2014 : 24/11/2013.

La récolte a été réalisée manuellement :

*2010-2011 : 27/06/2011 ;

*2011-2012 : 26/06/2012 ;

*2012-2013 : 03/07/2013 ;

*2013-2014 : 24/06/2014

Deux désherbages ont été utilisés ; le premier est manuelle a eu lieu le 19-03-2014 et l'autre est chimique a eu lieu le 08-04-2014 par le désherbant GranStar 75DF, à raison de 12 grammes /hectare. Des mesures réalisées par une tarière ont permis de suivre l'humidité du sol sur deux profondeurs : (0-25cm et 25-50cm).

2. Mesures et notations

2.1. Paramètres climatiques

2.1.1. Température et pluviométrie

La pluviométrie ainsi que la température maximale et minimale sont enregistrées quotidiennement.

2.1.2. L'humidité du sol

Un prélèvement de sol est effectué par décade à l'aide d'une tarière pédologique sur une profondeur de 50cm où on a précisé deux horizons H1 (0-25cm) et H2 (25-50cm). Pour chaque horizon, nous avons prélevé un échantillon de 50 grammes du sol frais, après l'avoir passer à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures, nous avons repesé et calculé son humidité pondérale selon la formule suivante :

Humidité pondérale (%) = (Poids frais – Poids sec) / Poids

2.2. Paramètres agronomiques

2.2.1. Le poids de mille grains (PMG)

Ce paramètre est mesuré après avoir déterminé le poids moyen d'un grain par plante de chaque génotype, multiplié par mille pour trouver le poids de mille grains.

2.2.2. Le nombre de grains par m²

Le nombre de grain par unité de surface est déterminé par calcul, utilisant la formule suivante:

$$NGM^2 = 1000(RDT/PMG)$$

Avec :

NGM² = nombre de grains/m² ;

RDT = rendement en g m⁻² ;

PMG = poids de 1000 grains en g.

2.2.3. Le nombre d'épi par m²

Est estimé à partir du comptage du nombre d'épi /m linéaire, ce dernier est rapporté au m².

2.2.4. Rendement en grain RDT

Rendement en grain RDT est déterminé suite à la fauche et le battage de la végétation d'un rang de 1m par parcelle élémentaire. Le rendement en grain chez le blé dépend fortement du nombre de grain par épi, du poids de mille grains par épi et du nombre d'épis par m² (Triboï, 1990).

Il est déterminé par la formule suivante:

$$\text{Rendement} = \text{Nombre d'épis/ m}^2 \times \text{Nombre de grains / épi} \times \text{PMG}$$

2.2.5. La biomasse aérienne :

Le poids de la biomasse aérienne accumulée à maturité, déterminée à partir d'un bottillon de végétation récolté d'un rang de 1m par parcelle élémentaire.

2.2.6. L'indice de récolte (IR ou HI)

Est déduit par le rapport du rendement en grain et de la biomasse aérienne mesurée à maturité :

$$\text{HI}(\%) = 100(\text{RDT}/\text{BIO})$$

3. Analyses statistiques

La comparaison de moyennes des paramètres mesurés est faite par le test LSD « Least significant difference » à l'aide du logiciel Costat.

Les corrélations et la comparaison entre deux moyennes (simulée, observée par le test de Student) ont été réalisés par le logiciel STATISTICA 7.

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Résultats

1.1. Température

Les températures moyennes mensuelles des saisons 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 du site expérimental sont similaires (Figure 5).

Le mois de Février de la campagne 2011/2012 était plus frais avec une température minimale journalière trop basse allant jusqu'à -1.5°C .

Le mois de Juin a été plus chaud pour les campagnes 2010/2011 et 2012/2013 avec des températures maximales allant presque à 45°C .

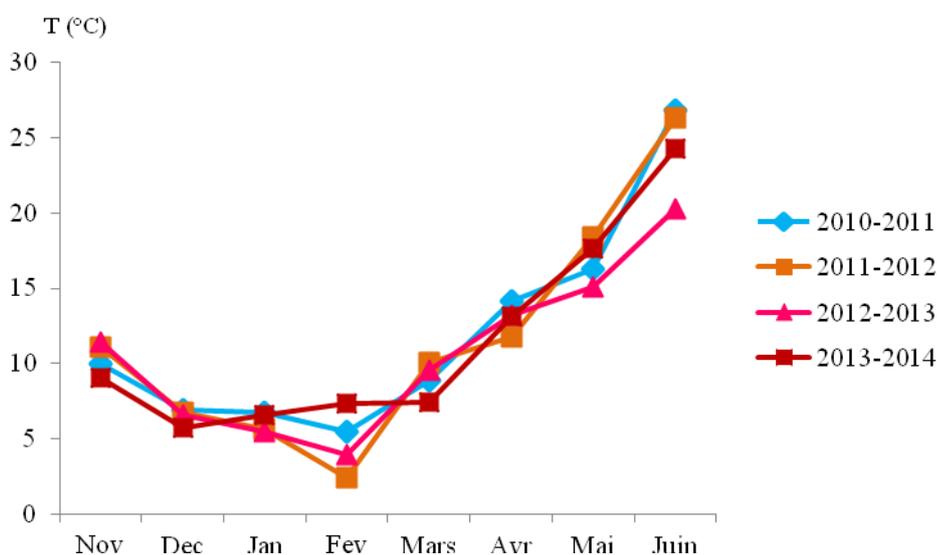


Figure 5. Températures mensuelles des campagnes 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014.

1.2. Pluviométrie

- Durant la campagne 2010/2011, 98 jours de précipitations ont été enregistrés. Le cumul des précipitations de Novembre à Juin 2011 a atteint 360,1 mm. Décembre, Janvier et Juin sont les moins pluvieux, respectivement : 20 ; 13,33 et 17,4 mm. Avril a enregistré 73.8 mm, alors que le pic a été enregistré au mois de Février avec 121mm, qui est presque équivalente à la moitié des précipitations cumulées durant le cycle culturel (Figure 6).

- Pour les campagnes 2011/2012 et 2012/2013 on a enregistré 93 jours de précipitations pour chacune, le cumul des précipitations de Novembre au Juin 2012 a atteint 274mm alors que le cumul de précipitations du mois de Novembre au Juin 2013 a atteint 384.2 ce dernier représente que la campagne 2012/2013 est la plus pluvieuse par rapport aux 3 autres campagnes. Mai, Mars, Juin et Décembre sont les mois les moins pluvieux, respectivement 6,6 ; 14,2 ; 16,4 et 19,4mm, la plus grande quantité de précipitations a été enregistré pour le mois d'Avril avec 86.2mm (Figure 6).
- La campagne 2013/2014 est la moins pluvieuse avec un cumul de 252.4mm dont 67 jours seulement de pluie. Avril, Juin et Février sont les mois les moins pluvieux respectivement 2,2 ; 7,4 et 16,9mm, le pic a été enregistré pour le mois de Mai avec une quantité de 60.8mm (Figure 6).

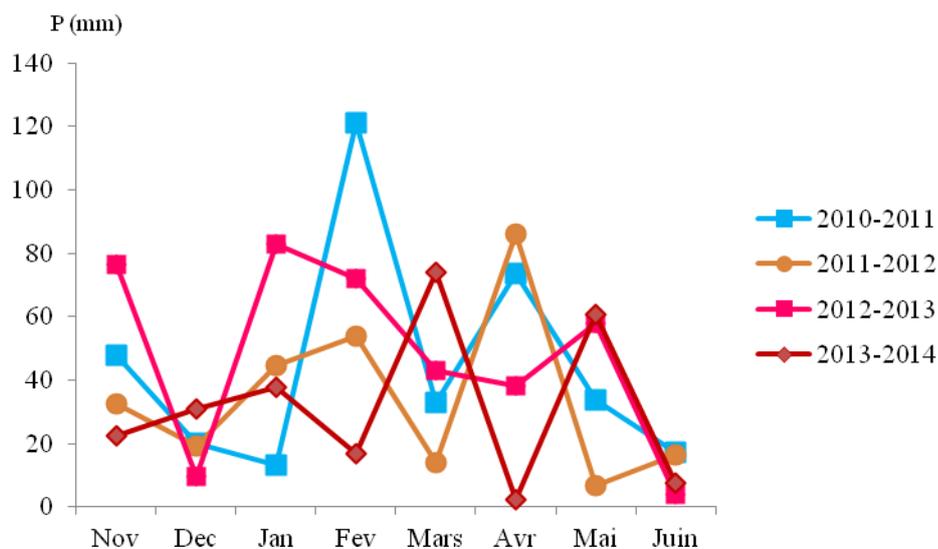


Figure 6. Précipitations mensuelles des campagnes 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014.

La comparaison des quatre diagrammes Ombrothermique (Figure 7, 8, 9 et 10) montre que la saison sèche a débuté en mois de Mai des deux campagnes 2010-2011 et 2011-2012, alors que pour la campagne 2012-2013 la sécheresse s'est déroulée en mois de Juin, mais pour la campagne 2013-2014, le mois d'Avril a connu une sécheresse sévère cette période se

coïncide avec le remplissage du grain c'est la cause des baisses du rendement, en mois de Mai on est arrivé à une pluviométrie de 60mm puis en mois de Juin la reprise de la sécheresse.

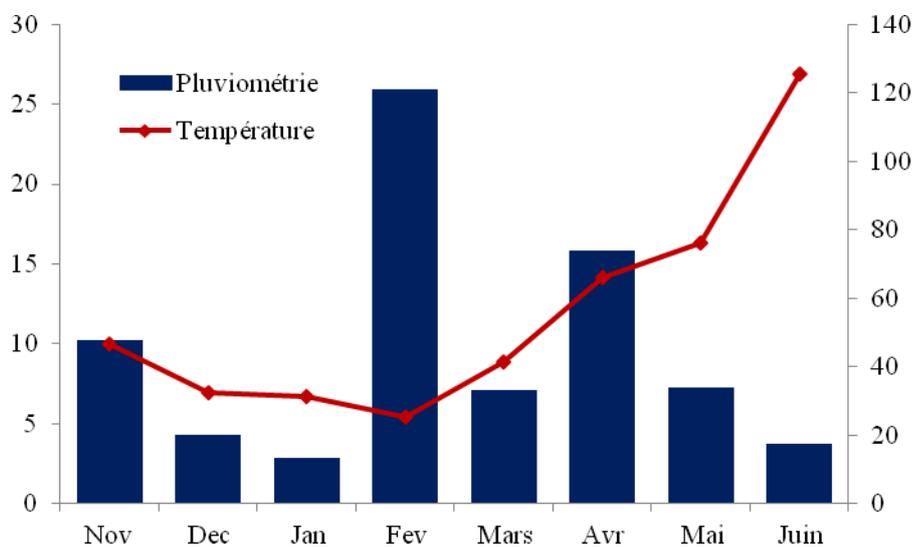


Figure 7. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2010/2011.

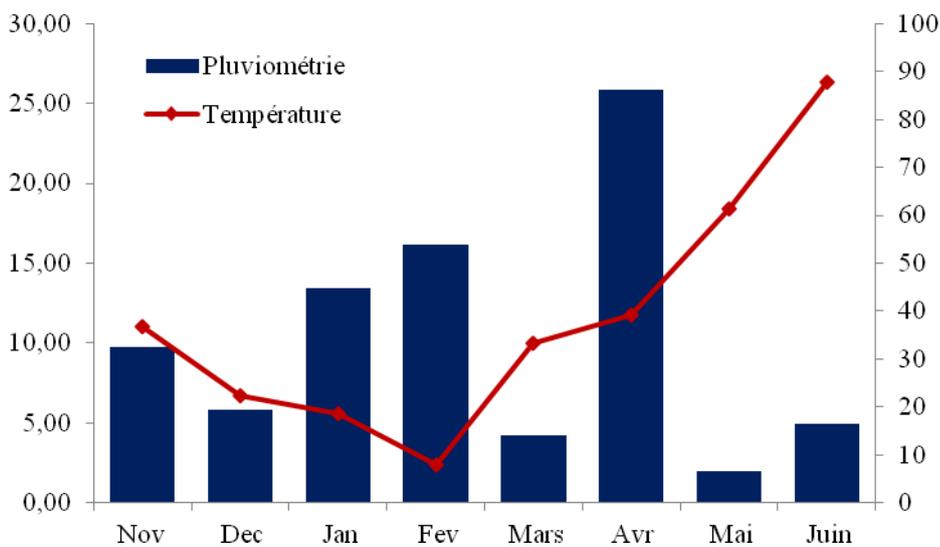


Figure 8. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2011/2012.

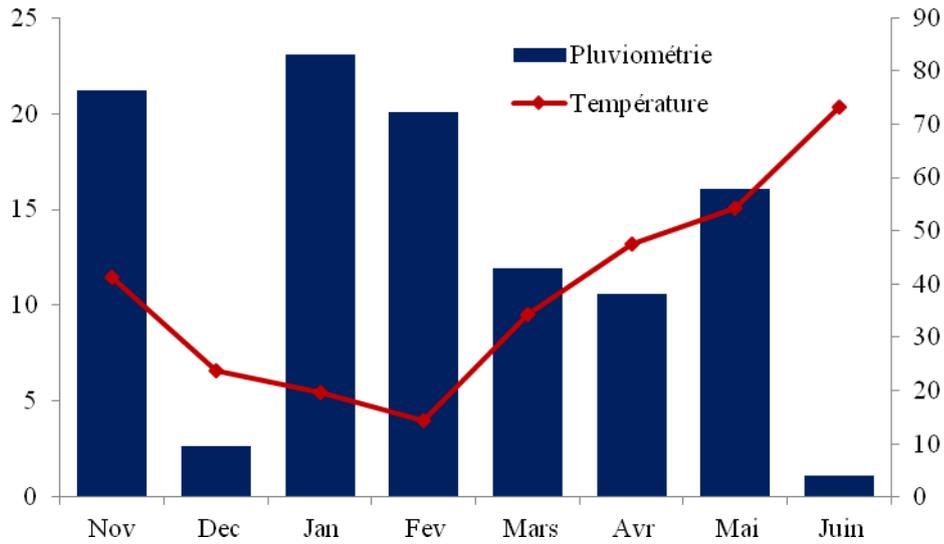


Figure 9. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2012/2013.

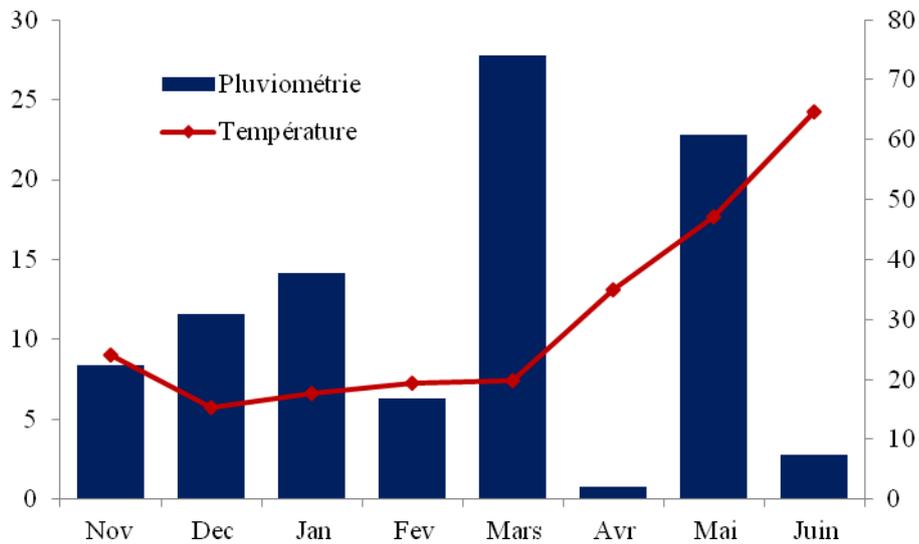


Figure 10. Diagramme Ombrothermique de la campagne 2013/2014.

1.3. Humidité du sol

Le suivi de l'humidité pondérale du sol par décade au cours du cycle végétatif sur les deux horizons H1 (0-25cm) et H2 (25-50cm), montre de grandes fluctuations allant de 11% à 28% pour l'horizon H1, et de 13% à 25% pour l'horizon H2 (Figure 11).

Ces variations sont le résultat de l'interaction de la composante "pluie, température, vent, radiations " avec le stade de développement de la culture.

Les variations de ces teneurs en eau sont aussi fonction de l'interaction complexe entre les mécanismes hydraulique du sol (remontée capillaire, percolation, drainage) d'une part et le développement racinaire d'autre part.

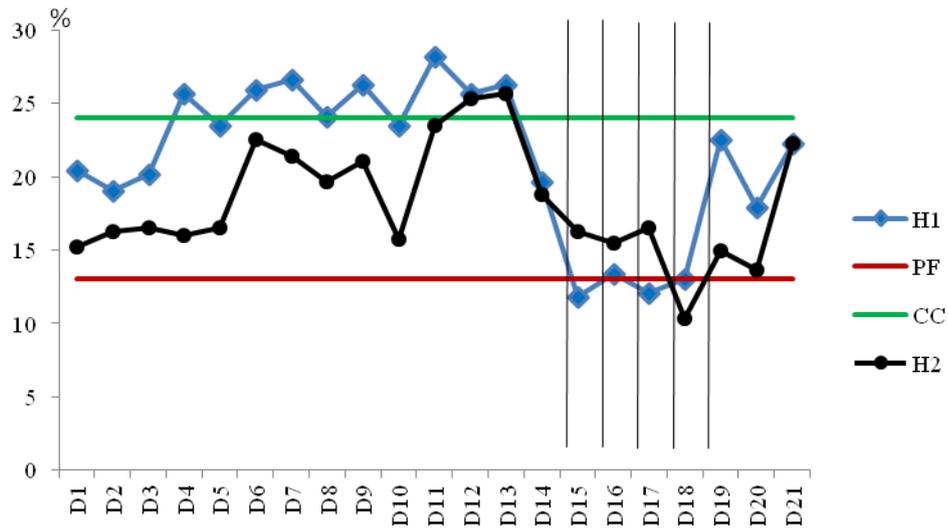


Figure 11. Fluctuation de l'humidité pondérale des deux premiers horizons du sol au cours du cycle végétatif.

1.4. Composantes du rendement

1.4.1. Rendement grain

- L'analyse de variance montre des effets génotypes significatifs au seuil de 5% pour la campagne 2010/2011, la variété Mexicali se détache en tête avec une moyenne de 59.63 qx/ha, en revanche la variété Oued Zenati marque le plus faible rendement avec 52.45 qx/ha, les deux autres variétés Altar et Bousselam ont marqués presque le même rendement avec 55.00 et 55.93qx/ha respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier 2 groupes homogènes le premier celui de Oued Zenati et le deuxième celui de Mexicali (Tableau 3).

- Pour la campagne 2011-2012, l'analyse de variance montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les variétés étudiées, mais la comparaison de moyenne à l'aide du test LSD permet de différencier deux groupes différents (Tableau 4). Les variétés Boussalem et Oued Zenati enregistrent le meilleur et le plus faible rendement avec 37.54qx/ha et 22.12qx/ha respectivement.

- Durant la campagne 2012-2013, l'analyse de variance montre un effet génotype significatif. La moyenne du rendement grain variait dans les quatre variétés entre 37 Qx/ha et 64.98 Qx/ha des variétés Bousselam et Altar respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier 2 groupes homogènes (Tableau 5).

- Pour la campagne 2013-2014, il n'y a pas de différence significative entre les variétés étudiées, la moyenne du rendement grain variait dans les quatre variétés entre 1.41 Qx/ha et 5.77 Qx/ha des variétés Belliouni et Ofanto respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier 2 groupes homogènes (Tableau 6).

*Les variétés Oued Zenati, Bousselam, Altar et Mexicali semblent parallèle pour la campagne 2010/2011 alors que durant la campagne 2011/2012 on a marqué une chute libre du rendement

pour les quatre variétés parce que cette saison est stressée par rapport aux deux autres campagnes, c'est la variété améliorée Bousselem qui a mieux résisté au stress puis la variété Mexicali suivi de Altar et Oued Zenati.

La variété introduite Altar qui est en premier lieu pour la campagne 2012/2013 et Bousselem qui a connu une baisse de rendement alors que Mexicali et Oued Zenati sont parallèle (Figure 12).

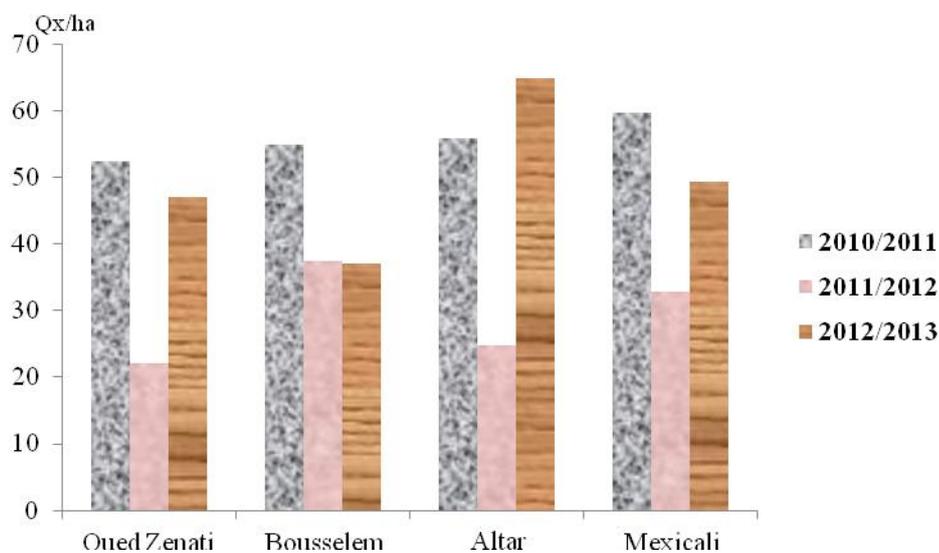


Figure12. Changement du rendement grain des variétés étudiées durant les trois Campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*Pour la campagne 2013/2014 qui est marquée par un stress sévère, ce sont les variétés Ofanto et Hoggar qui ont mieux résisté au stress Belliouni paraît la plus sensible (Figure 13).

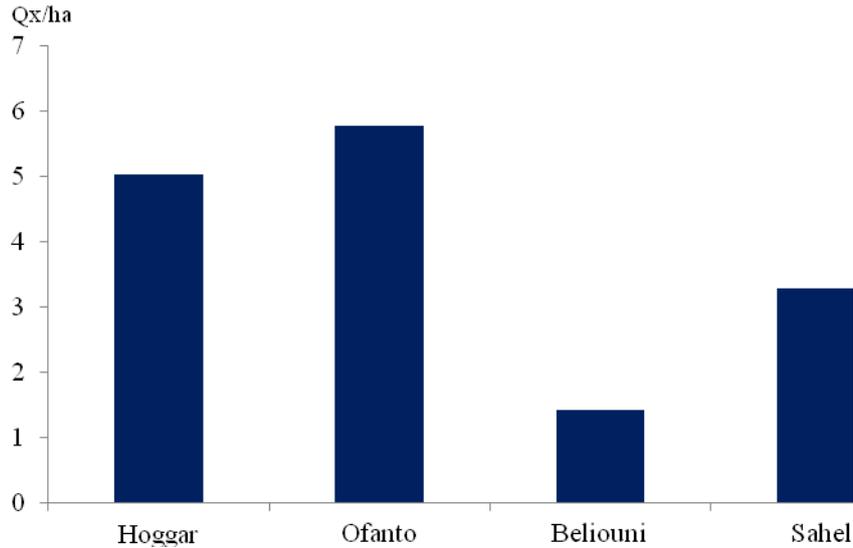


Figure 13. Changement du rendement grain des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014

1.4.2. Nombre d'épi par m²

- L'analyse de variance montre qu'il y a une différence hautement significative pour la campagne 2010-2011, c'est la variété Mexicali qui se classe en premier avec une moyenne de 293.32 épis/m² suivi de Bousselam et Altar avec 283.32 et 266.65 épis/m² respectivement et en dernier Oued Zenati avec 241.65 épis/m².

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier trois groupes homogènes (Tableau 3).

- L'analyse de variance des résultats du NE/m² de la campagne 2011-2012 montre qu'il n'y a aucun effet génotype, la moyenne du NE/m² variait dans les quatre variétés entre 156.66 épis/m² et 251.66 épis/m² des variétés Oued Zenati et Bousselam respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 4).

- Pour la campagne 2012-2013, l'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre les quatre génotypes, la moyenne du NE/m² variait entre 365 épis/m² et 435 épis/m² des variétés Oued Zenati et Altar respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 5).

- Pour la campagne 2013-2014, la moyenne du NE/m² variait dans les quatre variétés entre 129.99 épis/m² et 181.66épis/m² des variétés Beliouni et Sahel respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 6).

*Les variétés Oued Zenati, Bousselem, Altar et Mexicali ont presque le même comportement dans la même année mais si on prend chaque variété seule on marque une grande différence entre le comportement de la même variété durant les trois années sa reste en cause des conditions pédoclimatiques, notant que c'est la campagne 2012/2013 qui a donné les meilleurs résultats puis la campagne 2010/2011 suivi de la campagne 2011/2012 qui a connue un stress hydrique et thermique (Figure 14).

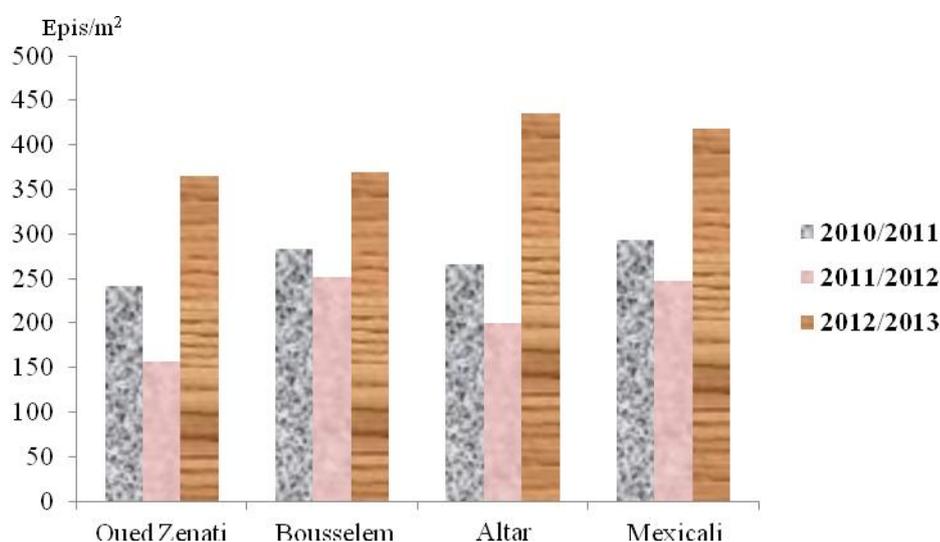


Figure 14. Changement du nombre d'épis/m² des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*Pour la campagne 2013/2014, la variété Sahel qui a donné le meilleur résultat et les variétés Hoggar, Ofanto et Belliouni semblent parallèle (Figure 15).

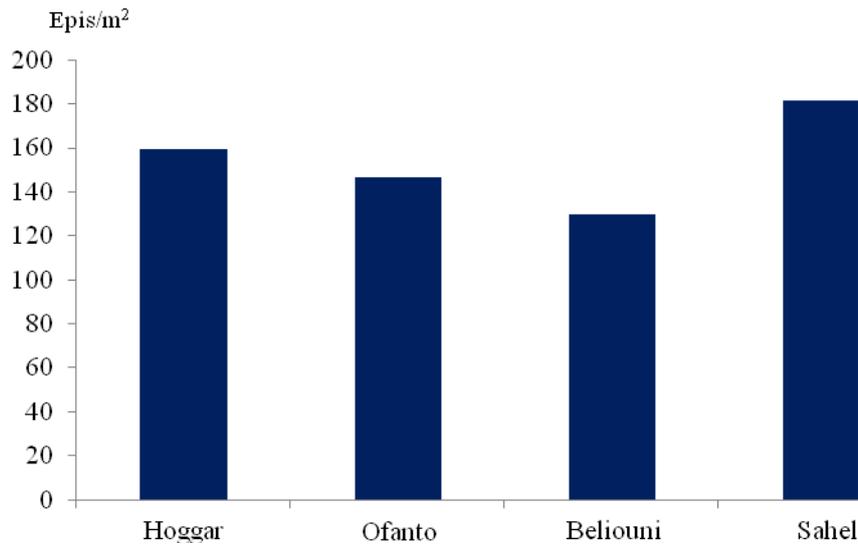


Figure 15. Changement du nombre d'épis/m² des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.

1.4.3. Nombre de grains par m²

- L'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre les géotypes pour la campagne 2010-2011, la variété Oued Zenati enregistre le nombre de grains par mètre carré top avec 31365.58 gr/m², et la valeur moyenne la plus faible est celle de Bousselam avec 9639.16 gr/m².

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 3).

- Pour la campagne 2011-2012, l'analyse de variance montre qu'il y a une différence significative au seuil de 5%, la moyenne du NG/m² variait entre 5157.33 g/m² et 9404.33 g/m² des variétés Oued Zenati et Bousselam respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 4).

- L'analyse de variance montre qu'il y a une différence très significative entre les variétés de la campagne 2012-2013, la moyenne du NG/m² variait entre 798.5 g/m² et 1471.95 g/m² des variétés Bousselam et Altar respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 5).

- L'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre les génotypes de la campagne 2013-2014, la moyenne du NG/m² variait entre 48.32 g/m² et 173.66 g/m² des variétés Belliouni et Ofanto respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 6).

*La variété Oued Zenati paraît la plus fertile durant la campagne 2010/2011 comparativement aux 3 autres variétés, et elle marque la meilleure valeur pour les trois campagnes, c'est la campagne 2012/2013 qui a donné les mauvais résultats peut être qu'ils sont dus à cause de l'égrenage car la récolte a été en retard (Figure 16).

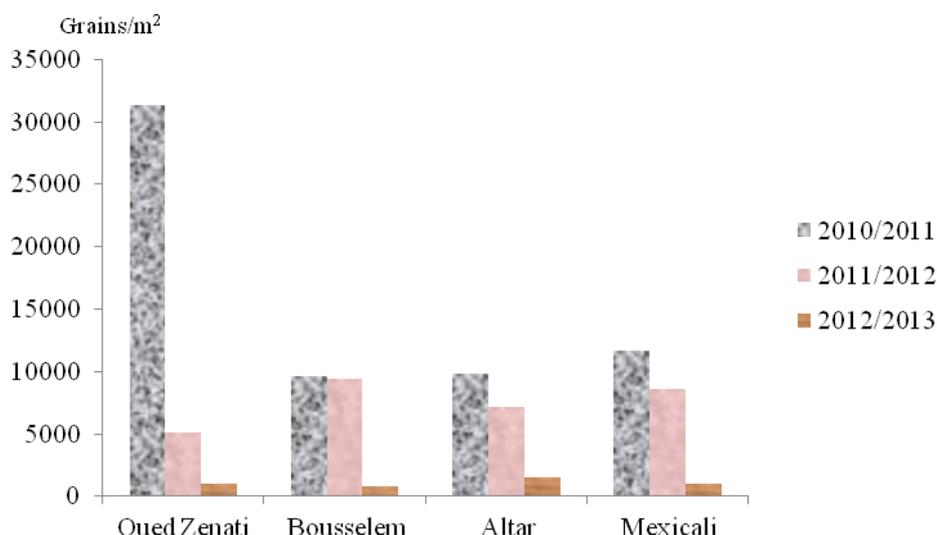


Figure 16. Changement du nombre de grains/m² des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*Pour la campagne 2013-2014, c'est la variété Ofanto qui paraît plus fertile comparativement aux autres variétés mais reste très faible si on la compare avec la variété Oued Zenati campagne 2011/2012 qui a connu un stress hydrique et thermique qui a donné un nombre de grains par mètre carré près de 5000 graines alors que Ofanto a enregistré seulement presque 180 graines (Figure 17).

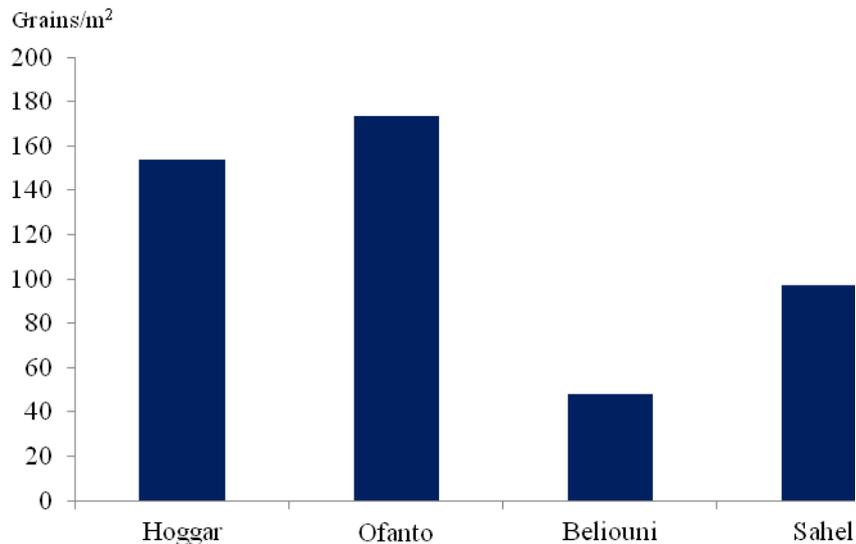


Figure 17. Changement du nombre de grains/m² des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.

1.4.4. La biomasse aérienne

- L'analyse de variance montre qu'il y a une différence très significative au seuil de 1% entre les différents génotypes durant la campagne 2010-2011, la meilleure biomasse accumulée est enregistrée pour Oued Zenati pour les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 avec une moyenne de 116.91 qx/ha, 79.83 qx/ha et 149.33 qx/ha respectivement. Altar, Mexicali et Bousselam ont donné la plus faible biomasse pour les trois campagnes respectivement avec 96.5 qx/ha, 70.83 qx/ha et 89 qx/ha.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier trois groupes homogènes pour la campagne 2010/2011, un seul groupe pour la campagne 2011/2012 et deux groupes pour celle de 2012/2013 (Tableau 3, 4, 5).

- Pour la campagne 2013-2014, l'analyse de variance a montré qu'il y a une différence significative entre les génotypes, la moyenne de la biomasse variait entre 8.47Qx/ha et 16.52Qx/ha des variétés Belliouni et Hoggar respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier deux groupes homogènes (Tableau 6).

*La variété Oued Zenati a donné les meilleurs résultats pour les trois campagnes comparativement aux autres variétés puis Mexicali et Altar qui sont presque parallèle après on trouve la variété Bousselem qui se classe en dernier (Figure 18).

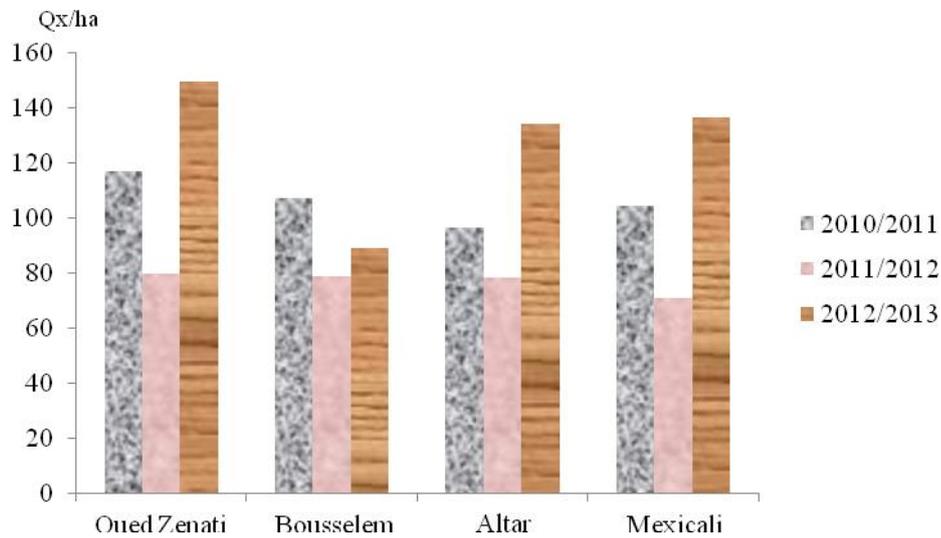


Figure 18. Changement de la biomasse des variétés étudiées durant les trois Campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*Pour la campagne 2013/2014, c'est la variété Sahel et Hoggar qui sont plus performantes comparativement aux autres variétés alors que Belliouni paraît la plus sensible à cet contrainte (Figure 19).

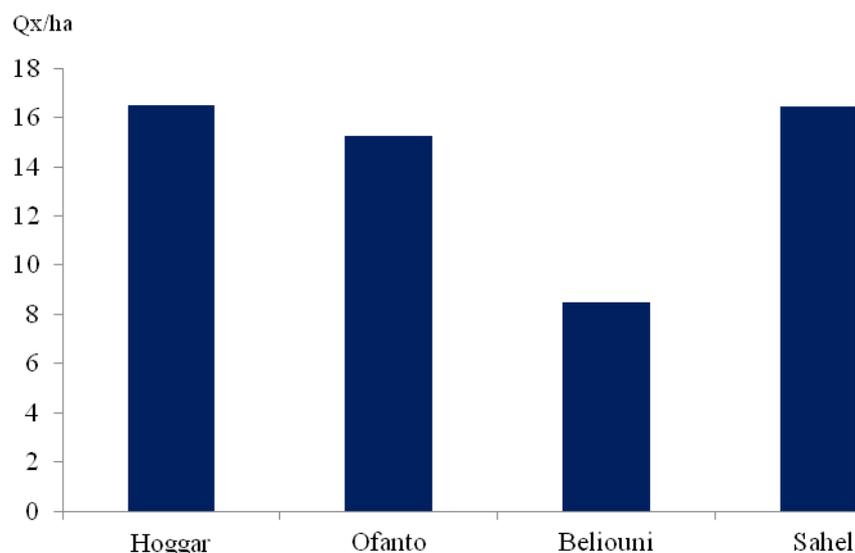


Figure 19. Changement de la biomasse des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014

1.4.5. Le poids de mille grains

- L'analyse de variance pour la campagne 2010-2011, montre qu'il y a une différence hautement significative entre les génotypes étudiés, c'est la variété Bousselam qui a le meilleur PMG avec une moyenne de 57.07g suivi d'Altar puis Oued Zenati et Mexicali avec respectivement 56.88g, 54.29g et 51.03g.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier trois groupes homogènes (Tableau 3).

- En 2011-2012, l'analyse de variance n'a pas donné de différence significative, la moyenne du PMG variait entre 35.04g et 43.15g des variétés Altar et Oued Zenati respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 4).

- Pour la campagne 2012-2013, les génotypes ne sont pas différents significativement pour ce paramètre, la moyenne du PMG variait entre 44.17g et 49.22g des variétés Altar et Mexicali respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 5).

- Ainsi pour la campagne 2013-2014, il n'y a pas de différence significative entre les variétés étudiées, la moyenne du PMG variait entre 29.41g et 34.24g des variétés Belioni et Hoggar respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 6).

*Les quatre variétés se comportent de la même façon durant les deux campagnes 2010/2011 et 2011/2012, alors que pour la campagne 2012/2013, c'est les variétés Oued Zenati et Bousselam qui ont donné de bons résultats sachant que cette campagne souffre d'un stress hydrique (Figure 20).

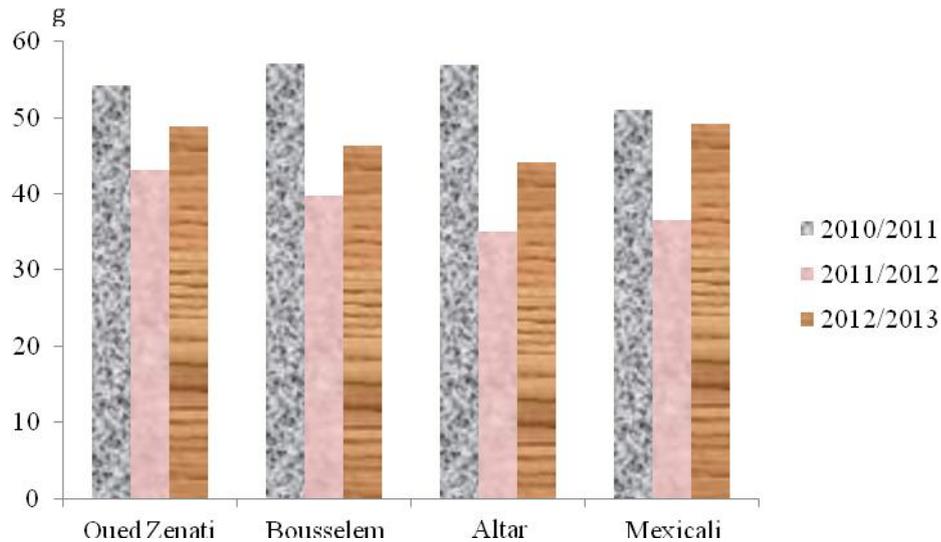


Figure 20. Changement du PMG des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*C'est la variété Hoggar qui a le meilleur PMG, en revanche, la variété Belliouni qui est la plus sensible pour la campagne 2013/2014 car cette dernière a souffert d'un stress hydrique et thermique sévère. On déduit que c'est la variété Hoggar qui est performante à cette contrainte pour ce paramètre (Figure 21).

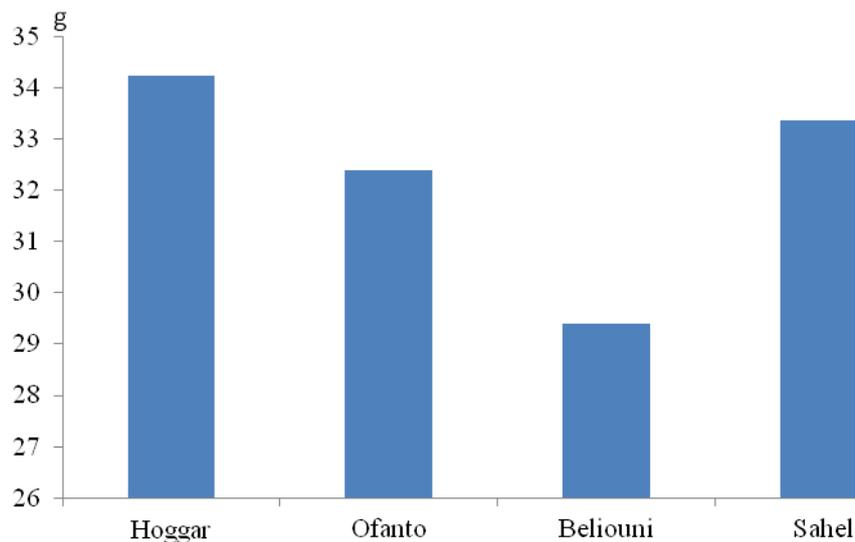


Figure 21. Changement du PMG des variétés étudiées durant la campagne 2013/2014.

1.4.6. L'indice de récolte

- L'analyse de variance montre qu'il y a une différence très significative entre les quatre géotypes pour la campagne 2010-2011, c'est la variété Altar qui a le meilleur indice de

récolte pour les trois campagnes avec respectivement 58.33%, 50.39% et 40.35% d'une part, d'autre part la variété Oued Zenati se caractérise par un indice de récolte faible pour les trois campagnes qui est de 44.75%, 30.12% et 31.74% respectivement.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis de différencier trois groupes homogènes pour les deux campagnes 2010/2011, 2011/2012 et un seul groupe pour la campagne 2012/2013 (tableau 3, 4, 5).

- Pour la campagne 2013-2014, c'est la variété Ofanto qui a le meilleur indice de récolte soit 42.22% d'une part, d'autre part Belliouni a un indice de récolte faible qui est de 19.61%.

La comparaison des moyennes par le test LSD nous a permis d'avoir un seul groupe homogène (Tableau 6).

*La variété Altar se comporte presque de la même façon durant les trois campagnes, alors que c'est Oued Zenati qui a exprimé le plus faible indice de récolte pour les trois campagnes comparativement aux autres variétés (Figure 22).

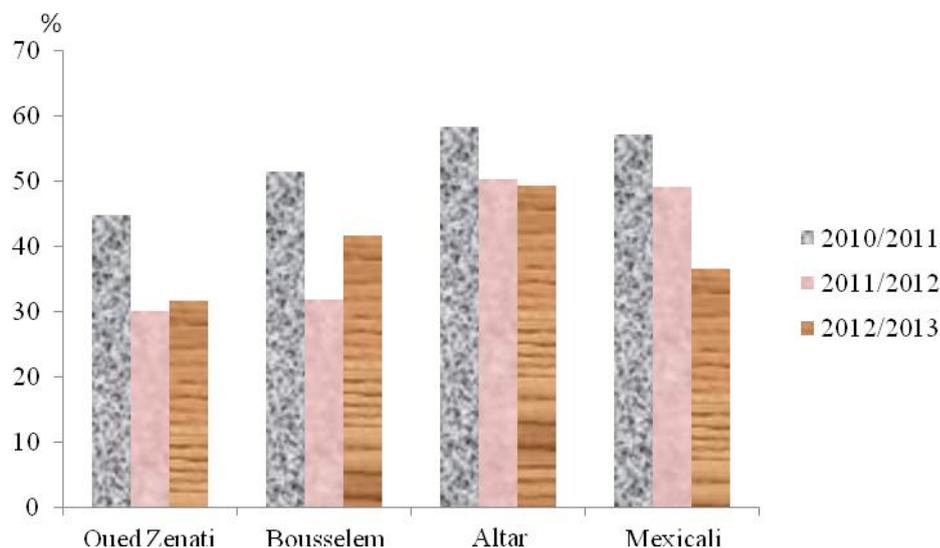


Figure 22. Changement de l'indice de récolte des variétés étudiées durant les trois campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

*C'est la variété Ofanto qui a le meilleur indice de récolte contrairement aux variétés Sahel et Belliouni qui ont le même et le plus faible indice de récolte pour la campagne 2013/2014 (Figure 23).

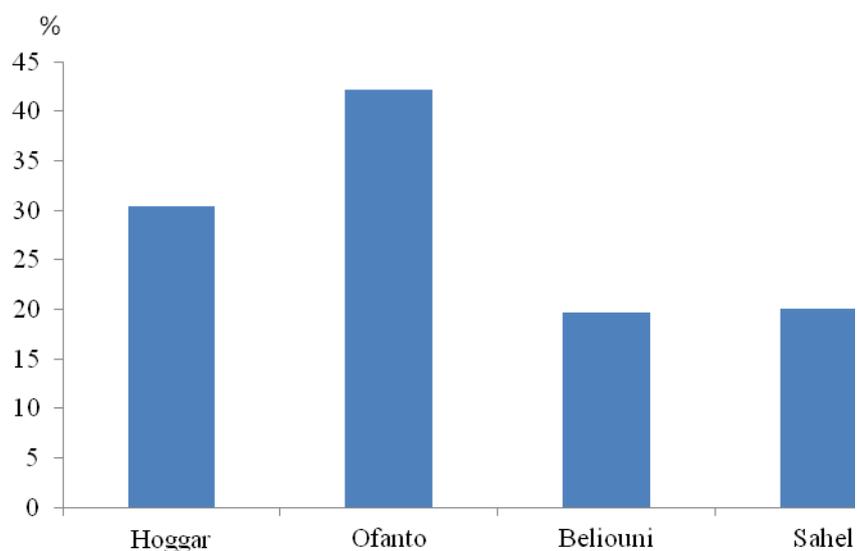


Figure 23. Changement de l'indice de récolte des variétés étudiées durant La campagne 2013/2014.

Tableau 3. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2010/2011

Géotype	NE/m ²	NG/m ²	BIO (Qx/ha)	RDT (Qx/ha)	PMG (g)	IR (%)
Oued Zenati	241,65 (c)	31365,58 (a)	116,91 (a)	52,45 (b)	54,29 (b)	44,75(c)
Bousselam	283,32 (ab)	9639,16 (a)	107,02 (ab)	55,00 (ab)	57,07 (a)	51,41 (b)
Altar	266,65 (b)	9839,01 (a)	96,5 (c)	55,93 (ab)	56,88 (a)	58,33 (a)
Mexicali	293,32 (a)	11689,89 (a)	104,29 (bc)	59,63 (a)	51,03 (c)	57,19 (a)
Moyenne	271,23	15633,41	106,19	55,75	54,82	52,92
Max	293,32	31365,58	116,91	59,63	57,07	58,33
Min	241,65	9639,16	96,5	52,45	51,03	44,75
LSD 0,05	19,85	35068,83	10,04	4,78	2,25	5,39

Tableau 4. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2011/2012

Génotype	NE/m ²	NG/m ²	BIO (Qx/ha)	RDT (Qx/ha)	PMG (g)	IR (%)
Oued Zenati	156,66 (b)	5157,33 (b)	79,83 (a)	22,12 (b)	43,15 (a)	30,12 (a)
Bousselam	251,66 (a)	9404,33 (a)	78,83 (a)	37,54 (a)	39,82 (a)	31,75 (a)
Altar	200,00 (ab)	7138,33 (ab)	78,00 (a)	24,86 (ab)	35,04 (a)	50,39 (a)
Mexicali	246,66 (a)	8617,66 (a)	70,83 (a)	32,90 (ab)	36,60 (a)	49,17 (a)
Moyenne	213,75	7579,41	76,87	29,35	38,65	73,69
Max	251,66	9404,33	79,83	37,54	43,15	50,39
Min	156,66	5157,33	70,83	22,12	35,04	30,12
LSD 0,05	88,83	2959,46	24,16	14,28	10,008	30,94

Tableau 5. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2012/2013

Génotype	NE/m ²	NG/m ²	BIO (Qx/ha)	RDT (Qx/ha)	PMG (g)	IR (%)
Oued Zenati	365,00 (a)	965,83 (b)	149,33 (a)	47,11 (b)	48,78 (a)	31,74 (b)
Bousselam	370,00 (a)	798,50 (b)	89,00 (b)	37,00 (b)	46,31 (a)	41,71 (ab)
Altar	435,00 (a)	1471,95 (a)	134,16 (a)	64,98 (a)	44,17 (a)	49,35 (ab)
Mexicali	418,33 (a)	1005,54 (b)	136,16 (a)	49,34 (b)	49,22 (a)	36,59 (ab)
Moyenne	397,08	1060,45	127,16	49,6	47,12	39,85
Max	435	1471,95	149,33	64,98	49,22	49,35
Min	365	798,5	89	37	44,17	31,74
LSD 0,05	203,01	240,93	44,34	14,65	7,87	16,61

Tableau 6. Comparaison des moyennes du rendement et de ses composantes durant la campagne 2013/2014

Génotype	NE/m ²	NG/m ²	BIO (Qx/ha)	RDT (Qx/ha)	PMG (g)	IR (%)
Hoggar	159,44 (ab)	153,67 (ab)	16,52 (a)	5,03 (ab)	34,24 (a)	30,43 (a)
Ofanto	146,66 (ab)	173,66 (a)	15,24 (a)	5,77 (a)	32,40 (a)	42,22 (a)
Belioni	129,99 (b)	48,32 (b)	8,47 (b)	1,41 (b)	29,41 (a)	19,61 (a)
Sahel	181,66 (a)	97,39 (ab)	16,46 (a)	3,28 (ab)	33,36 (a)	20,11 (a)
Moyenne	154,44	118,26	14,17	3,87	32,35	28,09
Max	181,66	173,66	16,52	5,77	34,24	42,22
Min	129,99	48,32	8,47	1,41	29,41	19,61
LSD 0,05	44,97	109,84	5,71	4,12	6,78	26,41

1.5. Résultats du modèle AquaCrop

1.5.1. Simulation du bilan hydrique

1.5.1.1. Paramètres de mesures :

A l'échelle du cycle cultural, les résultats de la simulation du bilan hydrique par le modèle AquaCrop indiquent un grand écart, entre évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle.

Tableau 7. Résultats de la simulation du bilan hydrique

compagne	ETP (mm)	ETR (mm)	SHT (%)	RDT	PMG
2010-2011	536	398	25,75	55,7	51,248
2011-2012	594	338	43,10	29,4	34,85
2012-2013	622	441	29,10	49,6	44,09
2013-2014	640	307	52,03	3,86	32,35

1.5.1.2. Phases du stress hydrique selon la phénologie

Le pourcentage du stress hydrique est calculé par la méthode utilisé par Doorenbos et Kassam (1979).

$$\text{Stress hydrique} = 1 - (\text{ETR} / \text{ETP})$$

Les valeurs du pourcentage de stress hydrique sont entre 0 et 1 ; 0=pas de stress, 1= stress.

c- Stade végétatif

Cette phase correspond à l'installation de la culture et l'augmentation du taux de la couverture végétale du sol, ce stade s'étale sur 201 jours pour la campagne 2010/2011. Le déficit hydrique est élevé pour ce stade durant les campagnes 2011-2012 et 2013-2014.

- Durant la campagne 2010-2011, l'évapotranspiration réelle (ETR) pour ce stade est relativement faible soit ; 297.06mm, alors que l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETP) est de 382.76mm, (Tableau 8). Le coefficient de stress $K_s = 0,57$, ceci signifie que l'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 57%.
- Pour la campagne 2011-2012, l'évapotranspiration réelle (ETR) est de 287.6 mm et l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETP) est 364.9 mm (Tableau 9). Le coefficient de stress pour ce stade $k_s = 0,62$. L'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 62%.

- Pour la campagne 2012-2013, l'évapotranspiration réelle (ETR) est de 362.01mm et l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETP) est 421.16 mm (Tableau 10). Le coefficient de stress pour ce stade $k_s = 0,56$. L'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 56%.

- Pour la campagne 2013-2014, l'évapotranspiration réelle (ETR) est de 240.65 mm et l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETP) est 348.32 mm (Tableau 11). Le coefficient de stress pour ce stade $k_s = 0,37$. L'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 37.24%.

Les campagnes les plus stressées durant ce stade sont 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013.

d- Stade reproductif

Ce dernier stade de développement, qui va de l'épiaison jusqu'à la maturité, a duré 30 jours. Il se caractérise par : une forte ETP et une faible ETR.

- Campagne 2010-2011 enregistre un cumule d'ETR et d'ETP de 99,80mm et 170,13mm respectivement, ce stade a été caractérisé par un stress hydrique de 40% (Tableau 8).

- Campagne 2011-2012 enregistre un cumule d'ETR et d'ETP de 51,55 mm et 201,87 mm respectivement, ce stade a été caractérisé par un stress hydrique très élevé 74% (Tableau 9).

- Campagne 2012-2013 enregistre un cumule d'ETR et d'ETP de 77,98 mm et 171,78 mm respectivement, ce stade a été caractérisé par un stress hydrique élevé 54% (Tableau 10).

- Campagne 2013-2014 enregistre un cumule d'ETR et d'ETP de 58.57 mm et 243.1 mm respectivement, ce stade a été caractérisé par un stress hydrique très élevé 75% (Tableau 11).

Les campagnes les plus stressées durant ce stade sont 2011/2012 et 2013/2014.

Tableau 8. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2010/2011

	Jour	ETP	ETR	Stress hydrique %
Oued zenati				
Stade végétatif	201	409,9	316,8	56%
Stade reproductif	194	178,5	86,9	51%
Bousselam				
Stade végétatif	195	375,1	290,1	56%
Stade reproductif	188	167,1	104,3	38%
Altar				
Stade végétatif	199	376,1	295	58%
Stade reproductif	188	167,4	101,2	40%
Mexicali				
Stade végétatif	197	369,9	286,3	58%
Stade reproductif	187	167,5	106,8	36%
Moyenne				
Stade végétatif	198	382,76	297,06	57%
Stade reproductif	189,25	170,13	99,8	41%

Tableau 9. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2011/2012

	Jour	ETP	ETR	Stress hydrique %
Oued Zenati				
Stade végétatif	201	394,6	296,5	68%
Stade reproductif	194	207,3	44,2	79%
Bousselam				
Stade végétatif	195	357,5	285,5	62%
Stade reproductif	188	200,2	54,4	73%
Altar				
Stade végétatif	199	357,3	284,4	60%
Stade reproductif	188	200,2	55	73%
Mexicali				
Stade végétatif	197	350,2	284	59%
Stade reproductif	187	199,8	52,6	74%
Moyenne				
Stade végétatif	198	364,9	287,6	62%
Stade reproductif	189,25	201,875	51,55	74%

Tableau 10. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2012/2013

	Jour	ETP	ETR	Stress hydrique %
Oued zenati				
Stade végétatif	201	441	378,3	58%
Stade reproductif	194	187,9	67,4	64%
Bousselam				
Stade végétatif	195	416,6	356,9	58%
Stade reproductif	188	166,8	81	51%
Altar				
Stade végétatif	199	416,7	357,9	54%
Stade reproductif	188	166,8	81	51%
Mexicali				
Stade végétatif	197	410,3	354,9	54%
Stade reproductif	187	165,6	82,5	50%
Moyenne				
Stade végétatif	198	421,16	362,01	56%
Stade reproductif	189,25	171,78	77,98	54%

Tableau 11. Pourcentage du stress hydrique durant la campagne 2013/2014

	Jour	ETP	ETR	Stress hydrique %
Hoggar				
Stade végétatif	163	369,7	239,2	35,29%
Stade reproductif	49	265,1	61,6	76,76%
Ofanto				
Stade végétatif	162	364,8	238,9	34,51%
Stade reproductif	50	272,4	61,9	77,27%
Beliouni				
Stade végétatif	176	416,2	244,3	41,3%
Stade reproductif	36	193,2	49,9	74,17%
Sahel				
Stade végétatif	167	386,6	240,2	37,86%
Stade reproductif	45	241,7	60,9	74,8%
Moyenne				
Stade végétatif	167	348,32	240,65	37,24%
Stade reproductif	45	243,1	58,57	75,75%

Les résultats ont montré que le stress hydrique est très important au stade végétatif pour les 4 variétés durant les campagnes 2010/2011 - 2012/2013 (Tableau 8, 9), et est plus fort au stade reproductif pour les 4 variétés durant les campagnes 2011/2012 – 2013/2014 (Tableau 10, 11).

1.5.2. Simulation des composants du rendement par AquaCrop

1.5.2.1. Rendement grain

Le modèle a surestimé le rendement des campagnes :

*2010-2011, de 16.70% à 26.34%

La variété Mexicali a obtenu la valeur la plus élevée (6.96 t/ha avec une surestimation de 16.70%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Oued Zenati (6.34t/ha avec une surestimation de 21.46%) (Tableau 12).

*2011-2012, de 61.96% à 137.34%

La variété Bousselam a obtenu la valeur la plus élevée (6,08 t/ha avec une surestimation de 61,96%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Altar (6.34t/ha avec une surestimation de 85,04%) (Tableau 13).

*2012-2013, de 2.47% à 77.30%

La variété Mexicali a obtenu la valeur la plus élevée (6,88 t/ha avec une surestimation de 39,55 %), le plus faible rendement est obtenu par la variété Oued Zenati (6,00t/ha avec une surestimation de 27,39%) (Tableau 14).

La valeur était réussite pour la variété Altar, durant cette campagne avec 6.49 t/ha observée et 6.65 t/ha simulée (une surestimation de 2.47 %)

*2013-2014, de -95.03% à 80.55%

La variété Hoggar a obtenu la valeur la plus élevée (0.91 t/ha avec une surestimation de 80.55 %), le plus faible rendement est obtenu par la variété Belliouni (0.007t/ha avec une sous-estimation de -95.03%) (Tableau 15).

La valeur était réussite pour la variété Ofanto, durant cette campagne avec 0.577 t/ha observée et 0.61 t/ha simulée (une surestimation de 5.72 %)

1.5.2.2. Biomasse

Le modèle a surestimé la biomasse aérienne :

*2010-2011 : de 12.07% à 25.51%

Les résultats de la simulation montrent que la valeur de la biomasse la plus élevée est de 13.77t/ha (variété Bousselam), avec une surestimation de 25.51% et la valeur la plus faible est de 13.42t/ha (variété Altar) avec une surestimation de 22.10% (Tableau 12).

*2011-2012 : de 55.20% à 73.51%

La variété Bousselam a obtenu la valeur la plus élevée (12.51 t/ha avec une surestimation de 58.70%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Altar (12.60t/ha avec une surestimation de 55.90%) (Tableau 13).

*2012-2013 de -7.37% à 52.70%

La variété Mexicali a obtenu la valeur la plus élevée (13.96 t/ha avec une surestimation de 2.57%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Altar (13.59t/ha avec une surestimation de 52.70%).

Les variétés Altar et Mexicali ont été bien simulé avec une petite surestimation de 2.16% et 2.57% (Tableau 14).

*2013-2014 de 379.41% à 871.66%

La variété Sahel a obtenu la valeur la plus élevée (8.48 t/ha avec une surestimation de 415.19%), le plus faible rendement est obtenu par la variété Hoggar (7.92t/ha avec une surestimation de 379.42%) (Tableau 15).

1.5.2.3. Indice de récolte (IR)

Le modèle a sous-estimé et surestimé l'indice de récolte:

*Campagne 2010-2011 : de -6.90% à 8.43%

Les deux variétés Bousselam et Altar ont été très bien simulées avec un écart de seulement 0.72% et 0.79% entre les valeurs observés et simulés (Tableau 12).

*Campagne 2011-2012 : de 1.63% à 53.02%

La variété Bousselam a été bien simulée avec une petite surestimation de 1.63% (Tableau 13).

*Campagne 2012-2013 : de 3.73% à 37.57%

C'est la variété Altar qui a été bien simulée avec une surestimation de 3.73% (Tableau 14).

*Campagne 2013-2014 : de -62.27% à -99.59%

C'est la variété Hoggar qui a eu la valeur la plus élevée 11.48t/ha avec une sous-estimation de -62.27%, et la variété Belliouni qui a eu la valeur la plus faible 0.08t/ha avec une sous-estimation de -99.59% (Tableau 15).

Tableau 12. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de la campagne 2010-2011

Génotype	Campagne de culture 2010/2011								
	RDT			Bio			IR		
	Observé	Simulé	Pe (± %)	Observé	Simulé	Pe (± %)	Observé	Simulé	Pe (± %)
Oued Zenati	5,22	6,34	21,46	12,28	13,76	12,07	42,52	46,10	8,43
Bousselam	5,50	6,95	26,34	10,97	13,77	25,51	50,14	50,50	0,72
Altar	5,59	6,88	22,99	10,99	13,42	22,10	50,90	51,30	0,79
Mexicali	5,96	6,96	16,70	10,74	13,46	25,33	55,53	51,70	-6,90
Mean	5,57	6,78	21,87	11,25	13,60	21,25	49,77	49,90	0,76
Min	5,22	6,34	16,70	10,74	13,42	12,07	42,52	46,10	-6,90
Max	5,96	6,96	26,34	12,28	13,77	25,51	55,53	51,70	8,43

Tableau 13. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2011-2012

Génotype	Campagne de culture 2011/2012								
	RDT			Bio			IR		
	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)
Oued Zenati	2,21	5,25	137,34	7,98	12,39	55,20	27,71	42,40	53,02
Bousselam	3,75	6,08	61,96	7,88	12,51	58,70	47,62	48,40	1,63
Altar	2,49	4,6	85,04	7,80	12,16	55,90	31,87	37,80	18,60
Mexicali	3,29	6,04	83,59	7,08	12,29	73,51	46,45	49,20	5,92
Mean	2,94	5,49	91,98	7,69	12,34	60,83	38,41	44,45	19,79
Min	2,21	4,60	61,96	7,08	12,16	55,20	27,71	37,80	1,63
Max	3,75	6,08	137,34	7,98	12,51	73,51	47,62	49,20	53,02

Tableau 14. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2012-2013

Campagne de culture 2012/2013									
Génotype	RDT			Bio			IR		
	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)
Oued Zenati	4,71	6,00	27,39	14,93	13,83	-7,37	31,55	43,40	37,57
Bousselam	3,70	6,56	77,30	8,90	13,59	52,70	41,57	48,90	17,62
Altar	6,49	6,65	2,47	13,41	13,70	2,16	48,40	50,20	3,73
Mexicali	4,93	6,88	39,55	13,61	13,96	2,57	36,22	47,00	29,75
Mean	4,96	6,52	36,68	12,71	13,77	12,52	39,44	47,38	22,17
Min	3,70	6,00	2,47	8,90	13,59	-7,37	31,55	43,40	3,73
Max	6,49	6,88	77,30	14,93	13,96	52,70	48,40	50,20	37,57

Tableau 15. Comparaison entre valeurs simulées et observées du rendement, biomasse et de l'indice de récolte de campagne 2013-2014

Campagne de culture 2013/2014									
Génotype	RDT			Bio			IR		
	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)	Observé	Simulé	Pe (±%)
Hoggar	0,504	0,91	80,56	1,652	7,92	379,42	30,43	11,48	-62,27
Beliouni	0,141	0,007	-95,04	0,847	8,23	871,66	19,61	0,08	-99,59
Sahel	0,329	0,018	-94,53	1,646	8,48	415,19	20,11	0,21	-98,96
Ofanto	0,577	0,61	5,72	1,524	7,98	423,62	42,22	7,64	-81,90
Mean	0,3088	0,386	-25,82	1,417	8,153	522,47	28,09	4,85	-85,68
Min	0,141	0,007	-95,03	0,847	7,92	379,41	19,61	0,08	-99,59
Max	0,577	0,91	80,55	1,646	8,48	871,66	42,22	11,48	-62,27

1.6. Effet du stress hydrique sur le rendement et le PMG durant les quatre saisons

- Pour la campagne 2010-2011, le stress hydrique dévie (inférieur) de la moyenne totale des quatre campagnes avec 30%, donc il y a un effet positif sur le rendement et le poids de mille grains même chose pour la campagne 2012-2013 dont le stress dévie de la moyenne de presque 25% (Figure 24).
- Alors que pour les deux campagnes 2011-2012 et 2013-2014 on a un effet négatif sur le rendement et le poids de mille grains où le stress est supérieur de la moyenne soit presque 15% et 35% respectivement pour lesquelles on a enregistré un stress de 43.10% et 52.03% pour les deux campagnes citée ci-dessus (Figure 24).

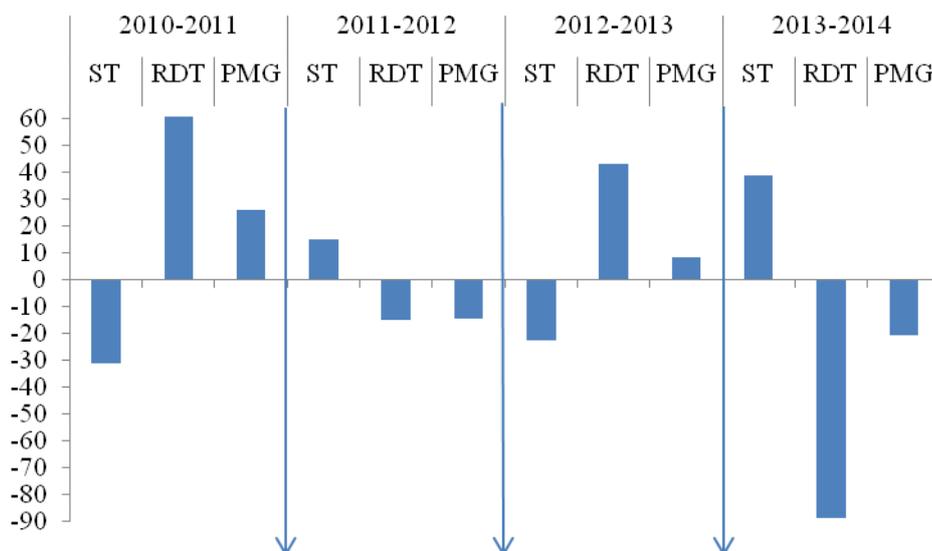


Figure 24. L'effet du stress hydrique sur le PMG et sur le rendement durant les quatre saisons.

2. Discussion des résultats :

2.1. Relation entre le rendement et ses composantes :

Le rendement en grain est la résultante de plusieurs caractères qui contribuent directement ou indirectement à sa réalisation (Mckee, 1978). Les épis et la biomasse aérienne sont des indicateurs de la capacité du génotype à produire plus de grains. En effet Mazouz (2006) indique que la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison peut-être utilisée comme un indicateur de la capacité différentielle des génotypes à faire une bonne utilisation des facteurs du milieu au cours de la période de la pré anthèse.

Elle est aussi un bon indicateur de l'activité photosynthétique de la même période. Les génotypes qui accumulent rapidement une biomasse élevée au stade épiaison souffrent moins des effets des stress de la post-anthèse qui sont plus fréquents (Haddad, 2009).

La biomasse aérienne accumulée est la résultante de la contribution de plusieurs caractères tels que la hauteur du chaume, la durée de la phase végétative, la vitesse de croissance végétative et le nombre de grains produits par unité de surface. La surface de la feuille étendard et le poids spécifique foliaire sont des indicateurs de la capacité photosynthétique au cours de la phase de remplissage du grains (Abbassenne *et al.*, 1998 ; Asseng *et al.*, 2003).

2.1.1. Nombre de grains/m²

Le rendement est fortement corrélé positivement et significativement au nombre de grains par mètre carré pour les trois campagnes 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 soit ($r = 0.96^*$), ($r = 0.96^*$) et ($r = 1.00^*$) respectivement (Figure 25, 26, 27), ces résultats corroborent avec ceux de Mazzouz (2006), et de Laala. Z (2009), ainsi Donmez et ses collaborateurs (2001) trouvent que le nombre de grains/m² est corrélé positivement avec l'augmentation de la biomasse et le rendement.

Waddington et ses collaborateurs (1987), Turner et Nicolas (1987), Mekhlouf et Bouerzour (2000) mentionnent que l'amélioration du rendement des cultivars récents est associée à l'amélioration de la biomasse.

Nos résultats confirment ceux de Fossati (1997) selon lesquels il faut augmenter le nombre de grains m^2 , pour accroître le rendement.

(Feil, 1992 ; Slafer *et al.*, 1993 ; Reynolds *et al.*, 1994 ; Calderini *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2002 ; Adjabi *et al.*, 2007 ; Pasquale *et al.*, 2007) indiquent que l'augmentation du rendement grain associé a une augmentation linéaire avec le nombre de grains/ m^2 .

En revanche, le rendement grain et le nombre de grain/ m^2 sont corrélés négativement et non significativement pour la campagne 2010/2011 soit ($r = -0.68$ ns).

Puisque le rendement grain est fortement lié au nombre de grain par unité de surface, ce dernier donc est un facteur limitant l'obtention de rendement grains élevés. Thorne et Wood (1987) ainsi que Vargas et ses collaborateurs (1999) mentionnent que l'amélioration de l'activité photosynthétique, tout juste avant l'anthèse, conduit à l'augmentation du nombre de grains par unité de surface et du rendement grain.

2.1.2. Nombre d'épis/ m^2

Un déficit hydrique à la montaison se traduit par la chute du nombre d'épis par m^2 , la régression intense des talles et la réduction du nombre de grains par épi, notamment par augmentation du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité du pollen (Slama *et al.*, 2005). Benbelkacem et Kellou (2001) mentionnent que l'apparition du déficit hydrique au début de la montaison réduit de 10 à 25% le nombre d'épis. Ben Salem et ses collaborateurs (1991) rapportent que dans les zones arides, le rendement est plus lié au tallage épis qu'au tallage herbacé. Ce qui s'explique par le fait que dans ces zones, toutes les talles produites, sous l'effet de la compétition pour l'eau, n'arrivent pas à former des épis.

Le nombre d'épis/ m^2 est fortement corrélé positivement et significativement avec le nombre de grains/ m^2 soit ($r = 0.98^*$) pour la campagne 2011/2012 (Figure 28), alors qu'il est

corrélé positivement et non significativement avec le rendement et l'indice de récolte soit ($r = 0.86$ ns), ($r = 0.82$ ns) respectivement, et il est corrélé négativement et non significativement avec le nombre de grains/m² ($r = -0.84$ ns).

Selon Bahlouli et ses collaborateurs (2008), l'expression d'un rendement élevé est associée positivement, aux nombres de grains par mètre carré, à un nombre d'épis par mètre carré et à la fertilité des épis. Simane et ses collaborateurs (1993) remarquent que le nombre de grains par épi contribue plus directement au rendement en grain chez le blé sous conditions semi arides. Bouzerzour et Oudina (1989) ont observé que le nombre de grains par épi et le nombre de grains par mètre carré sont positivement corrélés au rendement ceci est confirmé par les travaux plus récents de Bouzerzour et Benmahammed (1995).

Moragues et ses collaborateurs (2006) notent que les génotypes évoluant dans les régions froides et humides produisent plus de talles par rapport aux génotypes des régions plus sèches.

2.1.3. La biomasse

Selon Richards et ses collaborateurs (1997), une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique et ses collaborateurs (1989) mentionnent qu'un long cycle de développement est plus favorable à la production d'une biomasse aérienne élevée. L'itinéraire de formation du rendement suit une cinétique qui débute par la formation des épis, suivi des sites des grains (Grafius et Hamid, 1978). Les stress précoces affectent la formation des épis et les sites des grains par épi. Alors que les stress plus tardifs affectent beaucoup plus le poids individuel du grain et le nombre de grains formés par unité de surface ensemencée (Fischer, 1985).

La biomasse est fortement corrélée positivement et significativement avec le poids de mille grains ($r = 0.97^*$) pour la campagne 2013/2014 (Figure 29).

2.1.4. Le poids de mille grains

Le nombre de grains par unité de surface est la composante la plus liée aux variations du rendement grain du blé (Frederick and Bauer, 1999) et par conséquent, le poids moyen du

grain peut être une importante source de variation du rendement grain (Calderini *et al.*, 2001), particulièrement dans les régions caractérisées par des stress. (Acevedo *et al.*, 1999).

Cependant, une association positive entre le poids de mille grains et le rendement soit ($r = 0.73$ ns). Golabadi et ses collaborateurs (2005) mentionnent que la sélection sur la base de la biomasse doit être faite sous conditions favorables, alors que sous conditions défavorables, la sélection doit être conduite sur la base du poids de l'épi et du poids de 1000 grains.

2.1.5. L'indice de récolte

L'indice cultural est le ratio entre le rendement grain et la biomasse aérienne (Donalds *et al.*, 1976 ; Hay, 1995), son amélioration peut être atteinte à travers une amélioration du poids du grain et/ou du nombre de grains/épi (Passioura, 1977).

Une corrélation positive entre l'indice de récolte et le rendement soit ($r = 0.82$ ns) et ($r = 0.89$ ns) respectivement pour les campagnes 2010/2011 et 2013/2014.

Siddique et ses collaborateurs (1989) montrent que l'indice de récolte est un bon indicateur de la tolérance à la sécheresse et aux hautes températures de fin de cycle.

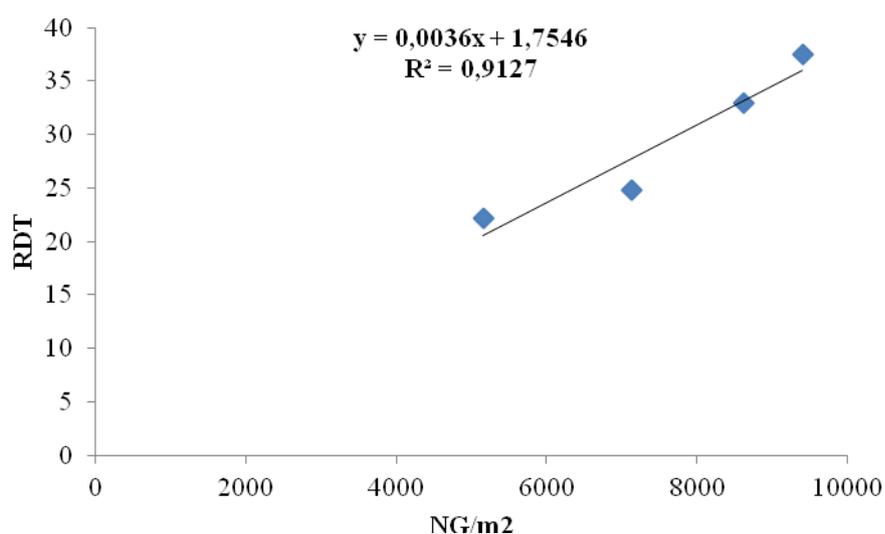


Figure 25. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m² de la campagne 2011/2012.

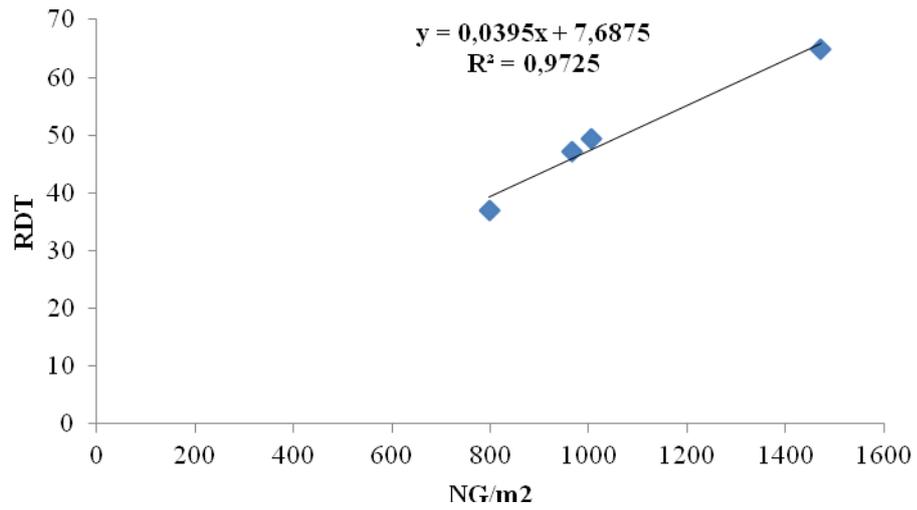


Figure 26. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m² de la campagne 2012/2013.

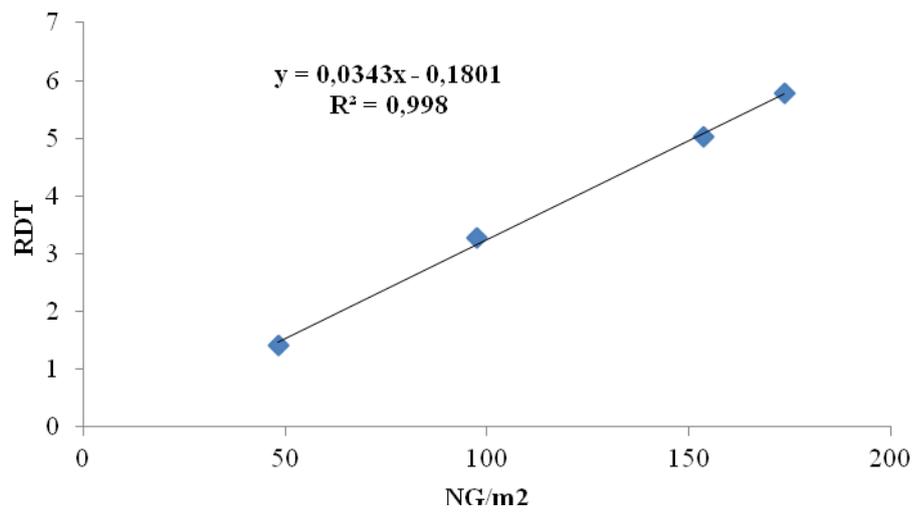


Figure 27. Relation entre le rendement et le nombre de grains/m² de la campagne 2013/2014.

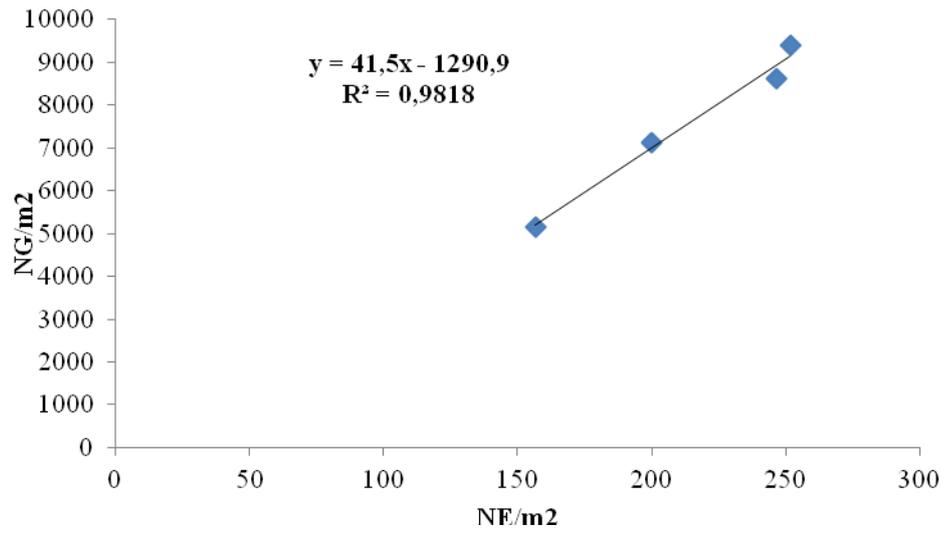


Figure 28. Relation entre le nombre d'épis /m² et le nombre de grains/m² de la campagne 2011/2012.

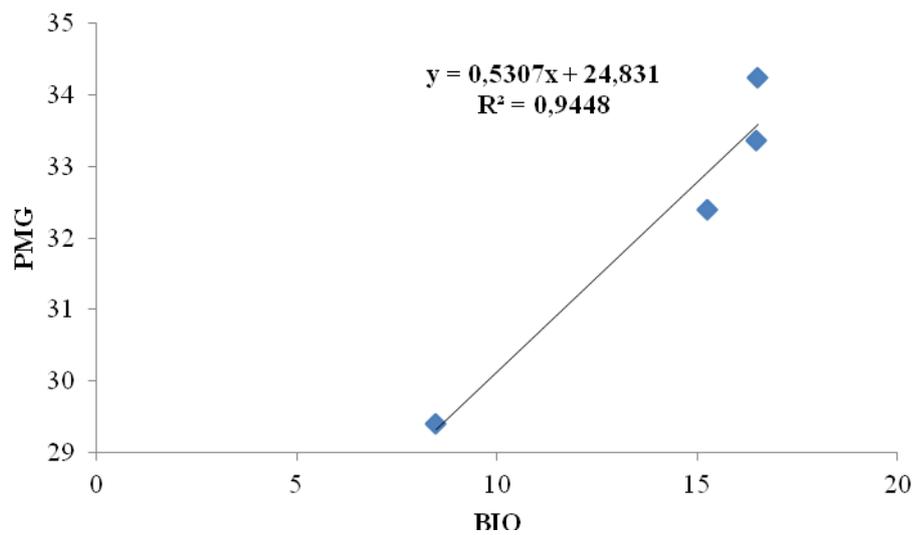


Figure 29. Relation entre PMG et le la biomasse de la campagne 2013/2014.

2.2. Effet du stress hydrique sur le rendement et ses composantes

Les régions méditerranéennes subissent plusieurs périodes de stress hydrique, au cours de la phase végétative et la phase reproductive du cycle de la culture (Elhani *et al.*, 2007).

Le stress hydrique peut réduire le potentiel de toutes les composantes du rendement, particulièrement le nombre d'épis fertiles par unité de surface ainsi que le nombre de grains par épi (Giunta & *al.*, 1993; Simane & *al.*, 1993; Abayomi & Wright, 1999). Cependant le poids du grain est négativement influencé par les températures élevées et la sécheresse durant la maturation (Chmielewski & Kohn, 2000).

Une relation négative entre le rendement et le stress hydrique pour les quatre saisons 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 soit respectivement ($r = -0.77ns$), ($r = -0.59ns$), ($r = -0.32ns$) et ($r = -0.94ns$), ainsi que pour les autres variables, le stress hydrique exerce un effet négatif sur les autres variables (Figure 30, 31, 32, 33).

Dans les régions méditerranéennes, le stress hydrique cause des baisses de rendements allant de 10 à 80% selon la campagne agricole (Nachit *et al.*, 1998). L'apparition du stress hydrique, après la floraison, influe négativement sur le poids de mille grains (Ceccarelli *et al.*, 1987). La sécheresse survenant pendant la période de croissance végétative, réduit surtout le nombre d'épis par unité de surface. Par contre, lorsqu'elle survient pendant la période de remplissage des grains, la sécheresse réduit le poids des grains (Lawlor *et al.*, 1981; Mogensen et Jensen., 1989 et Mogensen., 1991)

Le meilleur rendement a été enregistré pour la campagne 2010/2011 soit 55.7qx/ha parce que le déficit hydrique a eu lieu au moment de la phase végétative, le coefficient du stress durant tout le cycle est de 0.25 alors que le plus faible rendement est celui de la campagne 2013/2014 soit 3.88qx/ha qui a souffert d'un stress de 52.03% durant tout le cycle et précisément il s'est manifesté au moment de la phase reproductive avec un pourcentage supérieur de 74% pour les quatre variétés étudiée, puis on a 49.6qx/ha et 29.4qx/ha pour les

deux autres campagnes 2012/2013, 2011/2012 respectivement, cette dernière aussi a connue un stress de 43.1% durant tout le cycle notamment pour le stade reproductif qui est supérieur de 73% pour les variétés testées durant cette campagne, on déduit que le stade reproductif est le plus sensible à la sécheresse, cette dernière peut réduire les rendements de 73% environ, ces résultats sont similaires à ceux de Ben Naceur et ses collaborateurs (1999), à ceux d'El Batti, (1991), Caliandro et Boari (1996). C'est au cours de cette période critique, que la sécheresse induit l'avortement des fleurs. Même, si on trouve un nombre suffisant d'épis par unité de surface, ces épis seront quasiment vides, en cas de sécheresse sévère, survenant pendant cette période ; dans laquelle l'épi est déjà formé, mais les organes floraux, peuvent être endommagés, ce qui donne, des épis, dont la base et le sommet sont stériles ; d'où l'intérêt d'apporter une irrigation de complément, pendant cette période, afin d'atténuer les effets de la sécheresse et sauver le maximum de production en cas de déficit hydrique (Ben Naceur et al., 1999).

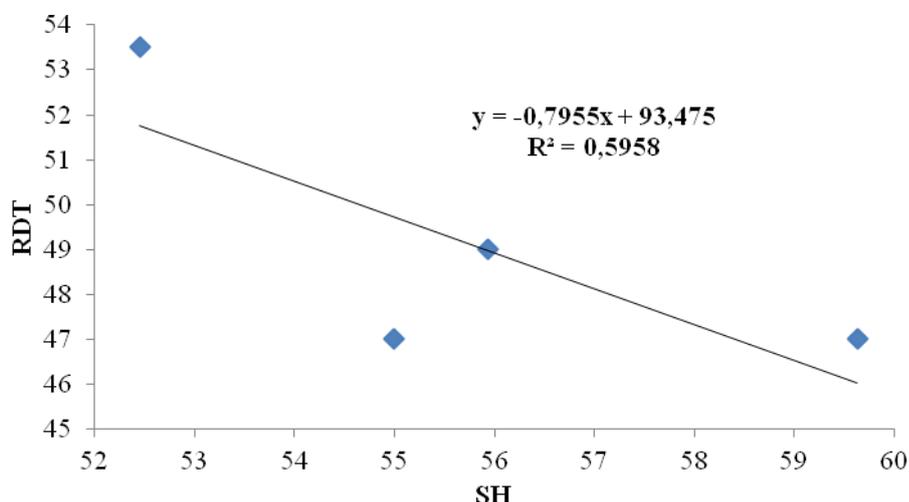


Figure 30. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2010/2011.

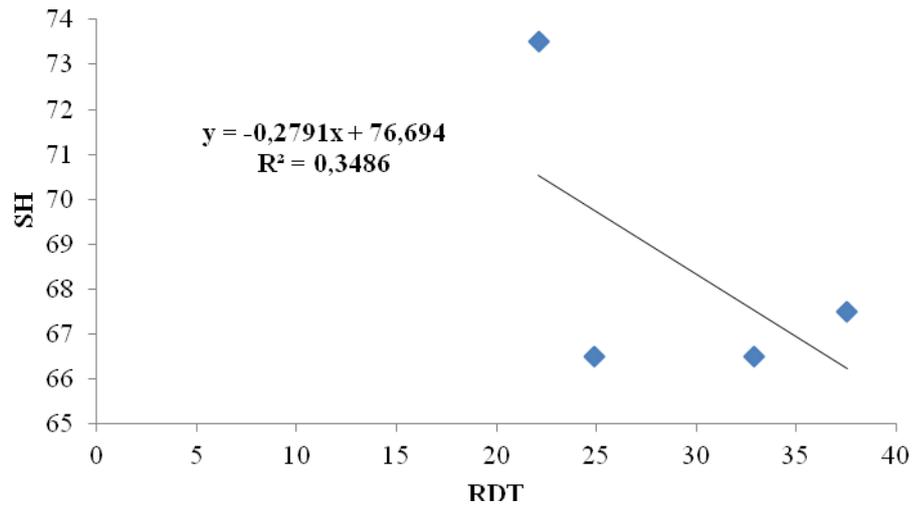


Figure 31. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2011/2012.

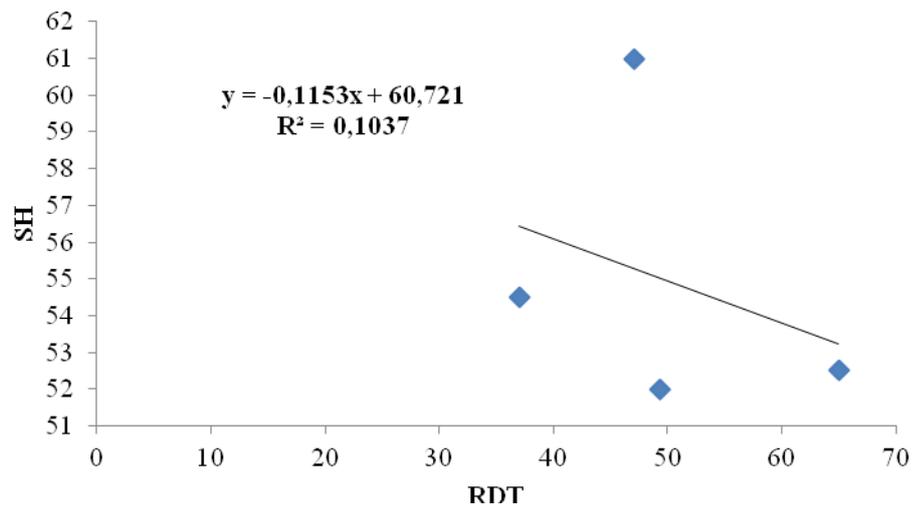


Figure 32. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2012/2013.

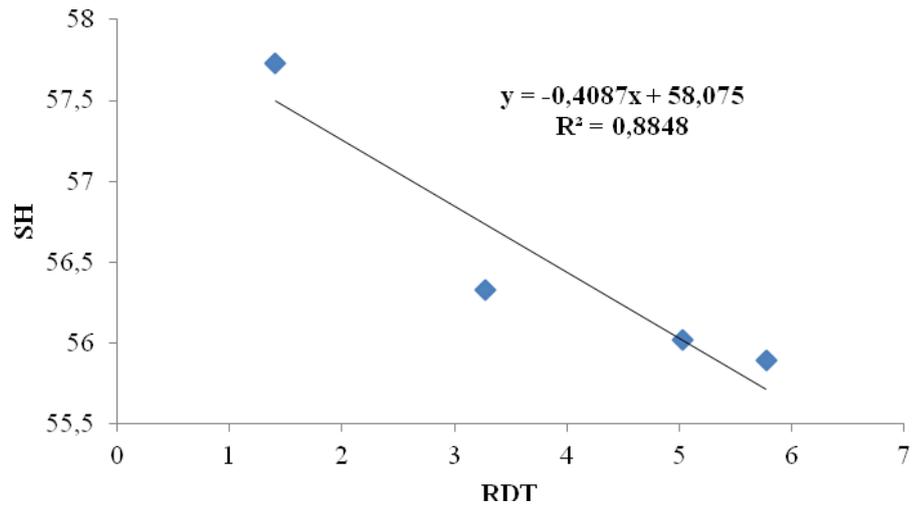


Figure 33. Relation entre rendement et le stress hydrique de la campagne 2013/2014.

2.3. Simulation par le modèle AquaCrop

2.3.1. Le rendement

Araya et ses collaborateurs (2010a) ont rapporté des valeurs $R^2 > 0,80$ lors de la simulation de la biomasse et le rendement en grain de l'orge hors-sol en utilisant AquaCrop cette simulation a indiqué que le rendement en grain simulé dévie du rendement observé avec - 13% à 15%.

Dans notre étude, on a trouvé une corrélation positive entre le rendement simulé et observé pour les trois saisons 2010/2011, 2011/2012, et 2013/2014 soit respectivement ($r = 0.78$), ($r = 0.82$), et ($r = 0.83$) (Figure 34, 35, 37). Contrairement, le rendement simulé est peu corrélé avec celui observé pour la saison 2012/2013 soit ($r = 0.2$) (Figure 36). Cela indique que le modèle a expliqué 60%, 67% et 68.8% (coefficient de détermination $R^2 = (r)^2$) de la relation entre le rendement simulé et celui observé.

L'indice d'agrément est de 0.27, 0.36 et 0.43 pour les campagnes 2010/2011, 2011/2012 et 2012/2013 respectivement, ces résultats indiquent que le modèle AquaCrop n'a pas bien simulé le rendement, alors que, pour la saison 2013/2014 l'indice d'agrément d est égale à 0.856 ce qui fait le modèle a bien simulé le rendement (Tableau 16).

Les valeurs d'AAE et RMSE sont 1.21t/ha, 1.22t/ha pour la saison 2010/2011, 2.55t/ha, 2.58t/ha pour la saison 2011/2012, 1.57t/ha, 1.85t/ha pour la saison 2012/2013 et 0.0015t/ha, 0.264t/ha pour la saison 2013/2014, le modèle a surestimé le rendement avec une déviation de 17.85%, 46.45%, 23.93% pour les campagnes 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 respectivement, et il l'a sous-estimé avec 0.52% pour la saison 2013/2014 (Tableau 16).

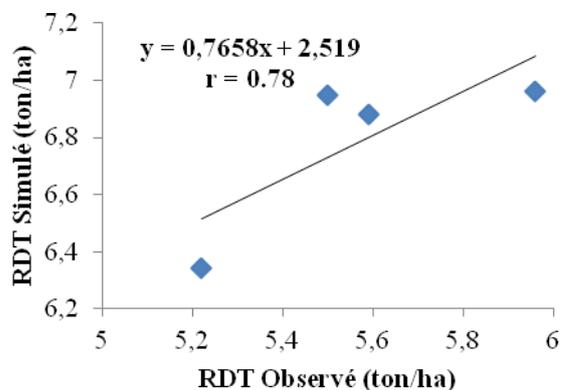


Figure 34. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2010/2011.

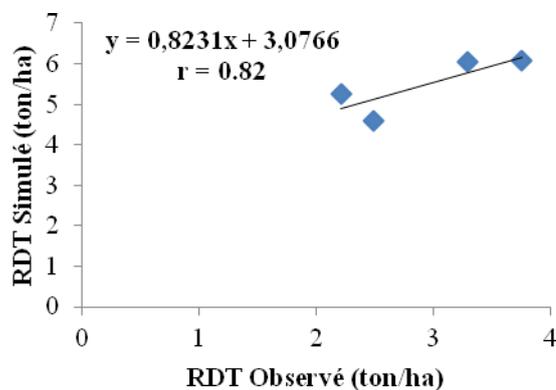


Figure 35. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2011/2012.

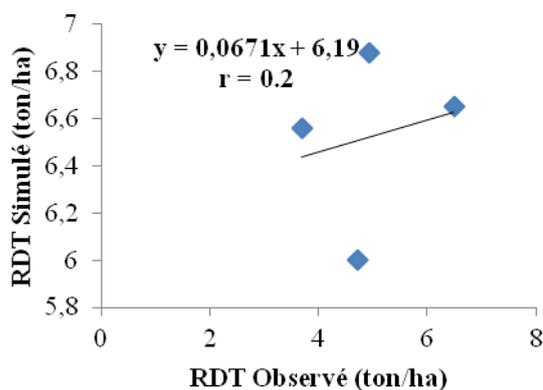


Figure 36. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2012/2013.

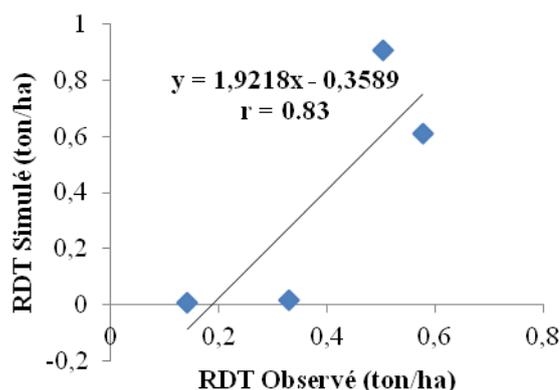


Figure 37. Relation entre le rendement simulé et observé de la campagne 2013/2014.

2.3.2. La biomasse

Zelege et ses collaborateurs (2011) ont utilisé AquaCrop pour simuler à la fois la biomasse totale et le rendement en grains pour le canola (*B. napus* L.) et ont indiqué que la différence entre les valeurs observées et simulées était $< 10\%$. A ce moment, Todorovic et ses collaborateurs (2009), lorsqu'ils ont évalué la capacité des trois modèles (AquaCrop, CropSyst et WOFOST) à simuler le rendement du Tournesol, ils ont signalé qu'AquaCrop a surestimé le

rendement du Tournesol de 1,2 %, tandis que CropSyst et WOFOST ont sous-estimé le rendement de 4,6 % et 0,3%, respectivement. Les auteurs ont conclu que l'AquaCrop nécessite moins de paramètres d'entrés par rapport aux deux autres modèles.

Dans notre étude, on a trouvé une corrélation positive entre la biomasse simulée et celle observée pour les deux saisons 2010/2011, 2012/2013 soit respectivement ($r = 0.59$), ($r = 0.74$) (Figure 38, 40), alors qu'elles sont peu corrélées pour la saison 2011/2012 (Figure 39), et une corrélation négative pour la campagne 2013/2014 (Figure 41).

L'indice d'agrément est de 0.30, 0.12 et 0.42 et 0.43 pour les quatre campagnes 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 respectivement (Tableau 16), ces résultats indiquent que le modèle AquaCrop n'a pas bien simulé la biomasse aérienne, surtout durant la campagne 2011/2012.

Les valeurs d'AAE et RMSE sont 2.35t/ha, 2.41t/ha pour la saison 2010/2011, 4.65t/ha, 4.66t/ha pour la saison 2011/2012, 1.61t/ha, 2.42t/ha pour la saison 2012/2013 et 6.73t/ha, 6.74t/ha pour la saison 2013/2014, le modèle a surestimé la biomasse aérienne avec une déviation de 17.28%, 36.68%, 7.70% et 82.62 pour les campagnes 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 respectivement (Tableau 16).

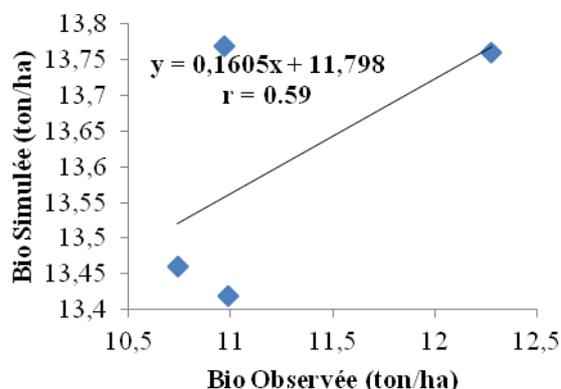


Figure 38. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2010/2011.

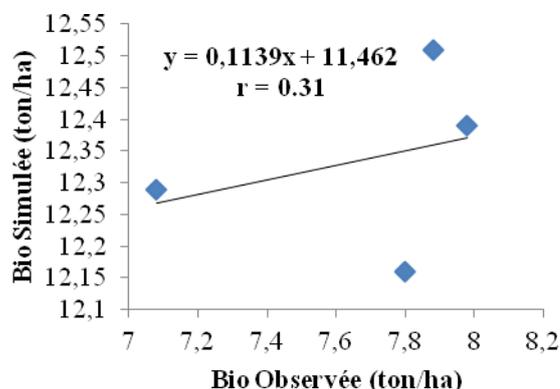


Figure 39. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2011/2012.

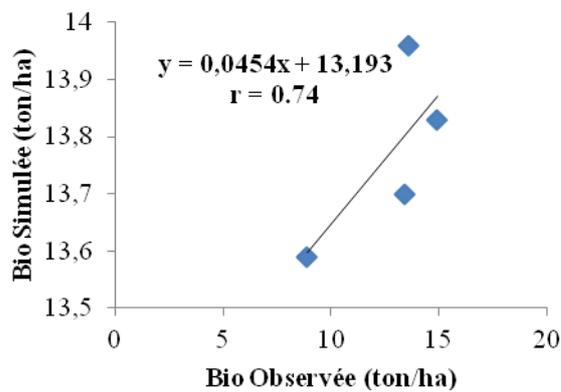


Figure 40. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2012/2013.

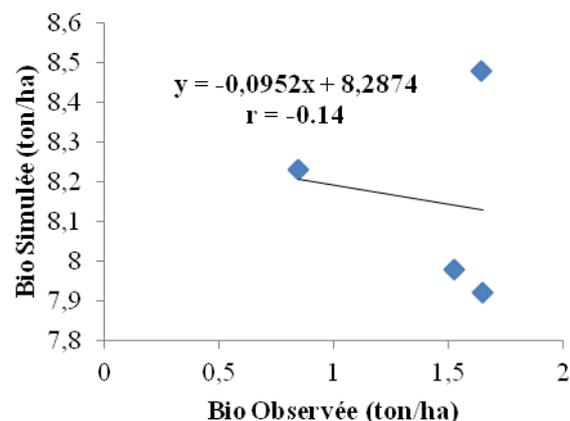


Figure 41. Relation entre la biomasse simulée et observée de la campagne 2013/2014.

2.3.3. L'indice de récolte

Dans l'AquaCrop, l'indice de récolte (IR) est simulé par une augmentation linéaire dans le temps (Steduto *et al.*, 2009).

Dans notre étude, on a trouvé que l'indice de récolte simulé est très corrélé avec celui observé pour toutes les campagnes 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 soit ($r = 0.95$) ; ($r = 0.85$), ($r = 0.95$), ($r = 0.73$) respectivement (Figure 42, 43, 44, 45).

L'indice d'agrément est de 0.99, 0.99, 0.6 et 0.331 pour les quatre campagnes respectivement ceci indique que le modèle a très bien simulé l'indice de récolte, sauf pour la saison 2013/2014 (Tableau 16).

Les valeurs de AAE et RMSE sont de 2.04t/ha, 2.63t/ha pour la saison 2010/2011, 6.03t/ha, 8.04t/ha pour la saison 2011/2012, 7.94t/ha, 8.85t/ha pour la saison 2012/2013, et 23.24t/ha, 24.14t/ha celle de 2013/2014 (Tableau 16).

Le modèle a été moins satisfaisant à simuler les rendements dans des conditions de stress hydrique (Neelam *et al.*, 2010).

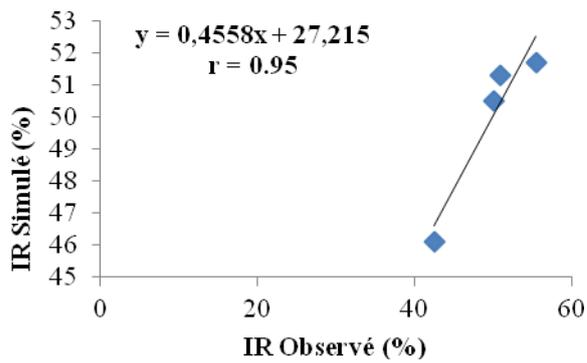


Figure 42. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2010/2011.

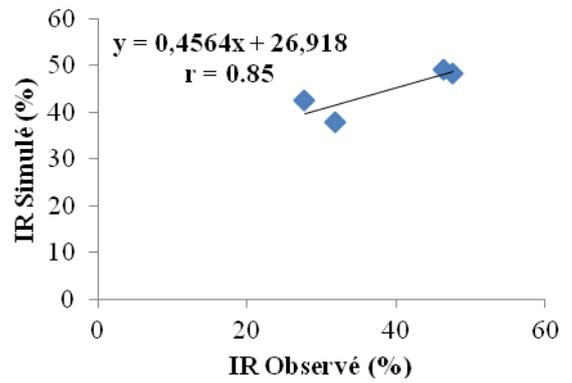


Figure 43. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2011/2012.

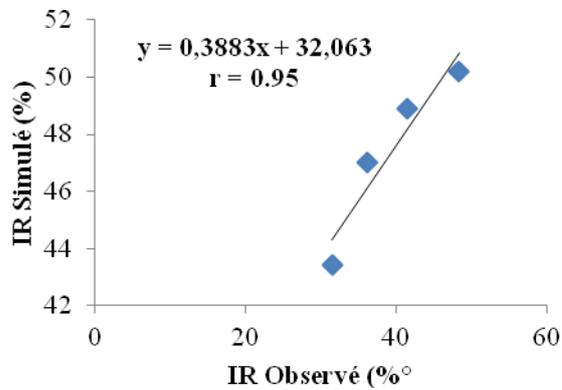


Figure 44. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2012/2013.

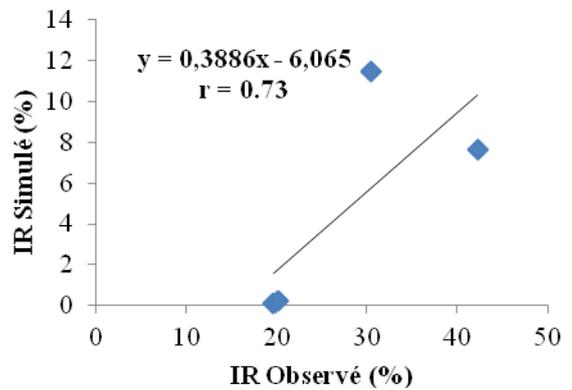


Figure 45. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé de la campagne 2013/2014.

Tableau 16. Valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle AquaCrop

		Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton %
2010/2011	RDT	5,57	6,78	1,21	1,22	0,27	17,85
	Bio	11,25	13,6	2,35	2,41	0,3	17,28
	IR	49,77	49,9	2,04	2,63	0,99	0,26
		Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton %
2011/2012	RDT	2,94	5,49	2,55	2,58	0,36	46,45
	Bio	7,69	12,34	4,65	4,66	0,12	37,68
	IR	38,41	44,45	6,03	8,04	0,99	13,59
		Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton %
2012/2013	RDT	4,96	6,52	1,57	1,85	0,43	23,93
	Bio	12,71	13,77	1,61	2,42	0,42	7,70
	IR	39,44	47,38	7,94	8,85	0,6	16,76
		Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton %
2013/2014	RDT	0,388	0,386	0,0015	0,264	0,856	-0,52
	Bio	1,417	8,153	6,735	6,748	0,43	82,62
	IR	28,09	4,85	23,24	24,146	0,331	-479,18

3. Synthèse

L'AquaCrop a bien simulé le rendement sauf pour la campagne 2012/2013 où on a marqué une faible corrélation entre les valeurs simulées et observées, ainsi la biomasse n'est pas bien simulée pour la campagne 2011/2012 et 2013/2014, l'indice de récolte a été bien simulé sauf pour la campagne 2013/2014, cela est dû à des problèmes de calibration ou bien à cause de la grêle qui a provoqué des dégâts sur la culture, ces derniers ont induit des erreurs sur la simulation du modèle.

La comparaison des moyennes par le test de Student entre les données simulées et observées du rendement, de la biomasse et de l'indice de récolte durant les quatre saisons 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014, a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs simulées et observées. Donc après quatre ans de suivi, on peut dire que le logiciel a pu simuler le rendement, la biomasse et l'indice de récolte.

Il y a une corrélation positive et significative entre les valeurs simulées et observées du rendement, de la biomasse et de l'indice de récolte durant les quatre saisons soit ($r = 0.95$, $r = 0.98$, $r = 0.86$) (Figure 46, 47, 48).

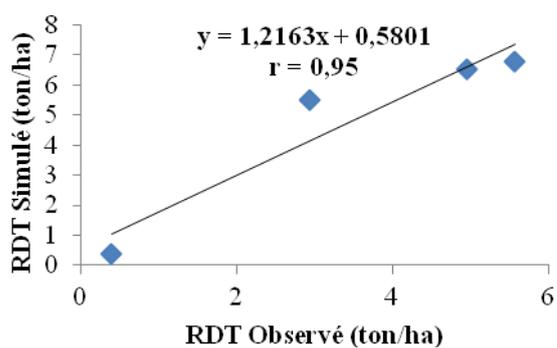


Figure 46. Relation entre le rendement simulé et Observé durant les quatre saisons

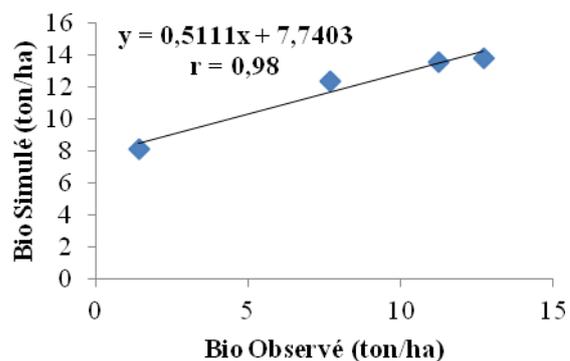


Figure 47. Relation entre la biomasse observée et simulée durant les quatre saisons

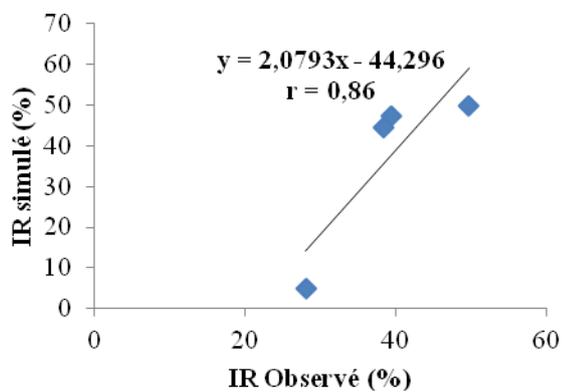


Figure 48. Relation entre l'indice de récolte simulé et observé durant les quatre saisons

CONCLUSION

L'analyse du rendement à travers ses composantes a mis en évidence diverses associations, signalées dans des études antérieures. On note que le nombre de grains produit par unité de surface est la composante la plus corrélée au rendement pour les quatre campagnes (2010-2014).

Ce travail nous a permis d'évaluer le comportement d'une collection de variétés tout au long des trois saisons 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, et celui d'une deuxième collection durant la saison 2013/2014. Il en résulte que les variétés Mexicali et Altar (variétés introduites) qui ont le meilleur rendement pour les trois campagnes, alors que pour la campagne 2013/2014 c'est la variété Ofanto qui a le meilleur rendement, cette dernière est une variété tolérante parce que cette campagne a connu un stress hydrique sévère surtout pour le stade reproductif.

Les résultats ont montré que le stress hydrique est modéré au stade végétatif pour les quatre variétés durant les campagnes 2010/2011 - 2012/2013, et il est sévère au stade reproductif pour toutes les variétés durant les campagnes 2011/2012 – 2013/2014.

D'une façon générale, les variétés les plus performantes en ce qui concerne les composantes du rendement ;

*Pour le nombre d'épis par unité de surface, on a les variétés Mexicali et Sahel.

*Pour le nombre de grains par unité de surface, on a les variétés Oued Zenati et Ofanto.

*Pour la biomasse, on a les variétés Oued Zenati, Hoggar et Sahel.

*Pour le poids de mille grains, on a Oued Zenati et Hoggar.

*Pour l'indice de récolte, on a les variétés Altar et Ofanto.

Le modèle de culture AquaCrop a été utilisé pour simuler le rendement, la biomasse et l'indice de récolte tout au long des quatre saisons (2010-2014), ainsi il a permis de déterminer des paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration et la transpiration de la culture afin

d'estimer le coefficient du stress et les phases stressées, cette estimation a confirmé l'importance de l'action du stress terminal sur les géotypes.

Selon les résultats obtenus, on peut dire que la simulation du rendement, de la biomasse et de l'indice de récolte par le modèle AquaCrop a été acceptable puisqu'on a noté une bonne corrélation entre les valeurs simulées et observées pour les quatre compagnes, ainsi le test de Student a confirmé ces résultats.

La simplicité d'AquaCrop, ses données d'entrée nécessaires minimales facilement disponibles ou accessibles en font un outil convivial. Il est très utile pour les simulations de scénarios à des fins de planification et pourra être utilisés par les économistes, les administrateurs et les gestionnaires de l'eau.

Le prolongement de ces travaux de thèse pourrait se faire en tentant

-D'appliquer cette méthode de simulation par le modèle AquaCrop sur d'autres types de sol étalée sur plusieurs années, ce modèle est particulièrement adapté pour améliorer les conditions où l'eau est un facteur limitant de la production agricole.

-De créer des variétés qui valorisent mieux l'eau.

-De préparer des journées pour les agriculteurs et les informer du moment où on doit faire l'irrigation d'appoint.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbassenne F., Bouzerzour H., Hachemi L. (1998). Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride. *Ann. Agron. INA*, 18: 24-36.
- Abayomi Y. and Wright, D. (1999). Effects of water stress on growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Trop. Agric.* 76 : 120–125.
- Acevedo E.H., Silva P.C., Silva H.R. and Solar B.R., (1999). Wheat production in Mediterranean environments. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. The Haworth Press Inc., New York, pp. 295–331.
- Adjabi A., Bouzerzour H., Lelarge C., Benmahammed A., Mekhlouf A. and Hanachi, A. (2007). Relationships between grain yield performance, Temporal Stability and Carbon Isotope discrimination in Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean conditions, *Journal of Agronomy*, 6(2) : 294-301.
- Angus J.F. and Van Herwaarden V.F. (2001). Increasing water use and water-use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.*, 93: 290–298.
- Annicchiarico, P., Chiari, T., Bazzani, F., Bellah, F., Doucene, S., Yallaoui-Ya`ici, N., Abdellaoui, Z., Belloula, B., Bouazza, L., Bouremel, L., Hamou, M., Hazmoune, T., Kelkouli, M., Ould-Said, H., Zerargui, H., (2002). Response of durum wheat cultivars to Algerian environments. I. Yield. *J. Agric. Environ. Int. Dev.* 96 : 157–187.
- Annicchiarico P., Abdellaoui, Z., Kelkouli, M., Zerargui H., (2005). Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *Journal of Agricultural Science*, 143: 57-67.
- Anonyme, 2006. La culture du blé dur (*Triticum durum*). ITGC.5p.
- Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M.P. and Royo C. (2002). Plant breeding and water relations in C3 cereals: what should we breed for? *Annals of Botany*, 89: 925-940.
- Araus J.L., Villegas., Aparicio D.N., García del Moral L.F., El Hani S., Rharrabti Y., Ferrio J.P. and Royo C. (2003). Environmental Factors Determining Carbon Isotope Discrimination and Yield in Durum Wheat under Mediterranean Conditions. *Crop Sci*, 43: 170–180.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K.M., Kebede A. and Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agric. Water Manage.* 97 : 1838–1846.

- Araya A., Keesstra, S.D. and Stroosnijder, L., (2010). Simulating yield response to water of Tef (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model *Field.Crop Res.* 116 : 1996–2204.
- Asseng S., Turner N.C., Botwright T. and Condon A.G. (2003). Evaluating the impact of a trait for increased specific leaf area on wheat yields using a crop simulation model. *Agron. J.*, 95: 10–19.
- Bahlouli F., Bouzerzour H. and Benmahammed A. (2008). Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12 (1): 31- 39.
- Bedrani S. (2004). L'alimentation de rue en Algérie : quelques réflexions sur la base d'une enquête visuelle rapide. *Alger. Options Méditerranéennes*, 36 : 25-46.
- Belhassen E., This D. and Monneveux Ph. (1995). L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. Synthèse. *Cahier agriculture*, 4: 251-261.
- Benbelkacem A. and Kellou K. (2001). Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie. *Options méditerranéennes*, 6: 105-10.
- Ben Naceur M., Gharbi M.S. and Paul R. (1999). L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie en matière de céréales. *Sécheresse*, 10 : 27-33.
- Ben salem M., Acévédó E. and Srivastava J.P. (1991). La sélection des céréales dans les zones arides. Synthèse. *Sécheresse*, 2: 17-20.
- Boote K.J., Jones J.W. and Pickering N.B. (1996). Potential uses and limitation of crop models. *Agronomy Journal*, 88 : 704-716.
- Bonhomme R. (1997). Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets., In INRA, ed. *L'eau dans l'espace rural*. Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A., Papy, F., Paris.
- Bonjean A. and Picard E. (1990). Les céréales a paille origine, historique, économie et sélection Eds Nathan, 235pages.
- Bouzerzour H. and Benmahammed A. (1995). Analyse graphique d'un croisement diallèle en orge. *Céréaliculture*, 28: 9-12.
- Bouzerzour H. and Oudina M. (1989). Variabilité du rendement de l'orge sous l'influence du climat des hauts plateaux. In séminaire W.O.M.Eds. ICARDA.110-119.

- Bozzini A. (1988). Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. In: Fabriani G. et Lintas C. (éd). *Durum: Chemistry and Technology*. AACCC (American Association of Cereal Chemists), Inc. St. Paul, Minnesota, États-Unis. pp 1-16.
- Calderini D., Dreccer F. and Slofer G.A. (1995). Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A reexamination of previous results and the latest trends. *Plant Breed.* 114:108-112.
- Calderini D.F., Savin R., Abeledo L.G., Reynolds M.P. and Slafer G.A. (2001). The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica*, 119 : 199-204.
- Callandro A. and Boari F. (1996). Supplementary irrigation in arid and semiarid regions *Medit.* 1 : 24 - 27.
- Castillon P. (1993). Le blé dur dans le sud-ouest .ITCF. 27p.
- Cattivelli., Crosatti C., Grosi M., Portesi A., Rizza F. and Stanca AM. (1995). Relationship among the modifications of gene expression induced by ABA, drought and gold stress in barley. In : *Reproductive Biology and Plant Breeding*. XIIIth EUCARPIA Congress 6-11 juillet 1992, Angers, France.
- Chaker A., Brinis L. (2005). Etude de l'impact de deux chocs thermiques (froid à 10°C et chaleur à 40°C) sur l'intégrité membranaires du blé dur. *Céréaliculture N°44*– 1er trimestre: 30- 35.
- Chennafi H., Aidaoui A., Bouzerzour H. and Saci A. (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci*, 5 : 854-860.
- Chmielewski F. and Kohn W. (2000). Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agric. Forest Meteorol.* 102 : 253–261.
- Clarke J.M., Norvell W.A., Clarke F.R. and Buckley T.W. (2002). Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci* .Revue Canadienne de phytotechnie, 82: 27-33.
- Croston RP., JT. Williams (1981). A world survey of wheat genetic resources. IBRG. *Bulletin/80/59*, 37 pages.
- Debaeke P., Cabelguenne M., Casals M.L. and Puech J. (1996). Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epiéphase-BI. Elsevier / INRA. *Agronomie : agriculture and environment*, 16: 25-46.

- Donalds, C.M. and Hambling, J. (1976). The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 28 : 361-411.
- Donmez E., Sears RG., Shroyer JP. and Paulsen GM. (2001). Genetic grain in yield attributes of winter wheat in the great plains. *Crop Science*. 41: 1412-1419.
- Doorenbos J. and Kassam A.H. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper n. 33.FAO, Rome, Italy, 193 pp.
- Derera N.F., Marshall D.R. and Balaam L.N. (1969). Genetic variability in root development in relation to drought tolerance in spring wheats. *Exp Agric* 5: 327-337.
- EL Batti F. (1991). Irrigation d'appoint des céréales; Recherche d'un optimum technique de production. *Memoire de fin d'etudes d'ingenieur de l'E.S.I.E.R.* 84p.
- El Hafid R., Smith D.H., Karrou M. and Samir K. (1998). Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a Mediterranean environment. *Euphytica*, 101: 273–282.
- Elhani S., Martos V., Rharrabti Y., Royo C. and Garcia del Moral L.F. (2007). Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments ; *Field Crops Research* 103 : 25–35.
- El Jaafari S., Qariani L., El Hadrami I., Fagroud M. and Paul R. (2000). Intégration des outils biotechnologiques et agrophysiologiques., *Le blé, une plante modèle. A l'occasion de la VIIe journées scientifiques du réseau AUF « biotechnologies végétales : amélioration des plantes et sécurité alimentaire »* Montpellier, 3-5 juillet 2000. Article apparu dans « Des modèles biologiques à l'amélioration des plantes ». Editeur scientifique. Serge h. IRD Editions. Collection colloque et séminaires. Paris 2001.
- Evans L.T. (1993). *Crop Evolution, Adaptation and yield*. Cambridge University. Press. Cambridge, UK. ISBN. 22:521-571.
- Faostat (2007). Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
- Farahani H.J., Izzi G. and Oweis T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.*, 101 : 469–476.
- Feil B., (1992). Breeding progress in small grain cereals- a comparison of old and modern cultivars *plant Breed.* 108: 1-11.
- Fisher R.A., Maurer R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 29: 697-912.

- Fischer R.A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agri. Sci. Camb.* 105: 447-461.
- Fossati D. (1997). Définition d'idéotypes pour le triticales. *Revue suisse Agric.* pp, 291- 296.
- Frederick J.R. and Bauer, P.J. (1999). Physiological and numerical components of wheat yield. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), *Physiological and numerical components of wheat yield. Wheat Ecology and Physiology of Yield Determination*. The Haworth Press Inc., New York, USA, pp. 45–65.
- Gaerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J.A., Taboada C., Mendoza J., Huanca R., Mamani A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V. and Steduto P. (2009a). Simulating yield response of quinoa to water availability with Aqua Crop. *Agron. J.*, 101 : 499–508.
- Gate Ph., Giban M., Blondlot A., Braun Ph., Couleaud G., Jouy L., Laurent F., Lutton A. and Vignier L. (2003). *Stades du blé*. Editions ITCF. 68 p.
- Giunta F., Motzo R. and Deidda M. (1993). Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticales in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.*, 33 : 399–409.
- Golabadi M., Arzani A. and Maibody S.M. (2005). Evaluation of variation among durum wheat F3 families for grain yield and its components under normal and water-stress field conditions. *Czech J. Genet. Plant Breed*, 41: 263-267.
- Grandcourt M.C. and Prats J. (1970). *Les céréales*. 2e édition Revue et Augmentée. Editeurs J.-B. Baillièrre et Fils. pp 22.
- Haddad, L. (2009). Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, Département Agronomie, Faculté des Sciences, UFAS, 70 pp.
- Hamid Z. A. and Grafius J. E. (1978). Development allometry and its implication to grain yield in barley. *Crop Sci.* 18:83-86.
- Havaux M., Hernez M. and Lannoye R. (1988). Correlation between heat tolerance tests. *J. Plant Phys*, 133: 550-560.
- Hay R.K.M. and Walker A.J. (1989). *An Introduction to the Physiology of Crop Yield*. Longman Scientific and Technical, Harlow. Hsu, J.C., 1996. *Multiple Comparisons: Theory and Methods*. Chapman & Hall, London, p. 277.
- Henry Y. and De Buyser J. (2000). L'origine des blés. *Pour la Science*, Hors-série n°26, pp 60-62.

- Hervieu B., Capone R. and Abis S. (2006). The challenge posed by the cereals sector. in the Mediterranean. Ciheam analytical note, N°9, 14pp.
- Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. (2009). AquaCrop— The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101: 448–459.
- Jacovides C.P. and Kontoyiannis H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agric. Water Manage.* 27: 365-371.
- Karakas O, Gurel F. and Uncuoglu AA. (2011). Assessment of genetic diversity of wheat genotypes by resistance gene analog-Est markers. *Genetics and Molecular Research* 10:1098-1110.
- Laala Z. (2009). Analyse en chemin des relations entre le rendement en grains et les composantes chez des populations F3 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Mémoire de magister, Dépt. Agronomie. Faculté des Sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif.
- Laing D.R. and Fischer R.A. (1977). Adaptation of semi-dwarf wheat cultivars to rainfed conditions. *Euphytica*, 26: 129-139.
- Laumont P. and Erroux J. (1961). Inventaire des blés durs rencontrés et cultivés en Algérie. *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 5 : 1- 96.
- Lawlor D.W., Day W., Johnston A.E., Legg B.J. and Parkinson K.J. (1981). Growth of spring barley under drought: crop development, photosynthesis, dry matter accumulation and nutrient content. *Agric. Sci. Camb.*, 96; 167 - 186.
- Legates D.R and McCabe G.J. Jr. (1999). Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1): 233–241.
- Levitt J. (1980). Responses of plants to environmental stress. Vol II Water, radiation, salt and other stresses. 2nd ed. New York ; London ; Sydney ; San Francisco : Academic Press, 25-229.
- Li L. and Yu Q. (2007). Quantifying the effects of advection on canopy energy budgets and water use efficiency in an irrigated wheat field in the North China Plain, *Agric. Water Manage.* doi:10.1016/j.agwat. 2006.12.003
- Loss, S.P., Sidique, K.H.M. (1994). Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in mediterranean environment. *Adv. Agron.* 52:229-276.

- M.A.D.R. (2007). Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Annuaire statistiques, Série B.
- Masle-Meynard J. (1980). L'élaboration du nombre d'épi chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse. Doc. Ing. INA Paris Grignon, 274 p.
- Mavromatis T., Boote K.J., Jones J.W., Irmak A., Shinde D. and Hoogenboom G., (2001). Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Science*, 41 : 40 - 51.
- Mazouz L. (2006). Etude de la contribution des paramètres phénol-morphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Mémoire de Magistère, Dépt. Agron. Fac. Sci, Université Hadj Lakhdar, Batna, 70 p.
- McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D.P. and Freebairn, D.M. (1995). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural research. *Agric. Syst.*, 50 : 255–271.
- McKee T., Doesken N. and Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim (California), 17–22 January.
- McKey J. (1968). Species relations in *Triticum*. Proc.2nd International Wheat Genetic symposium. *Hereditas*, 237-276.
- Mekhlouf A. and Bouzerzour H. (2000). Déterminisme génétique et associations entre le rendement et quelques caractères à variation continue chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Recherche Agronomique (INRAA)*, 7 : 37-49.
- Mekhlouf A., Dehbi F., Bouzerzour H., Hannchi A., Benmahammed A. and Ajabi A. (2006a). Relationships Between Cold Tolerance, Grain Yield Performance and Stability of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes Grown at High Elevation Area of Eastern Algeria. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(4): 700-708.
- Mekhlouf A., Bouzerzour H., Benmahammed A., Hadj Sahraoui A. and Harkati N. (2006b). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Article scientifique – *Sécheresse*, 17(4): 507-13.
- Mekliche A., Boukecha D. and Hanifi-Mekliche L. (2003). Etude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). I. Effet de l'irrigation de complément sur les caractères phénologique, morphologiques et physiologiques, 24 (1,2): 97-110.

- Merah O., Monneveux Ph., Nachit M., Deléens E. (1999). La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement photosynthétique : application à l'amélioration
- Mogensen V. O. and Jensen H. E. (1989). The concept of stress days in modelling crop yield response to water stress. Proceeding of the C.E.C Workshop: Management of water resources in cash crops and in alternative production systems. Brussels, 1988, 13 - 22.
- Mogensen V. O. (1991). Growth rate of grains of barley in relation to drought. Acta. Agric. Scand. 41: 345-353.
- Monneveux P. (1991). Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver. In : L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. AUPELF-UREF. Ed. John Libbey. Eurotest : 165- 186.
- Monteith J.L., (1996). The Quest for Balance in Crop Modeling. Agronomy Journal, 88 : 695 - 697.
- Moragues M., García del Moral L.F., Moralejo M. and Royo C. (2006). Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin: II. Biomass production and allocation. Field Crop. Res., 95, 182–193.
- Morizet J. (1984). Essai d'amélioration de la résistance à la sécheresse du tournesol (*Helianthus annuus*) par croisements interspécifiques avec une espèce sauvage (*Helianthus argophyllus*). Agronomie, 4 (6).
- Nachit M.M., Ketata H. (1986). Breeding strategy for improving durum wheat in mediterranean rainfed areas. Proceeding of 4 th International Wheat Conference, 2-9 may, Rabat, Morocco
- Nachit, M.M., Picard, E., Monneveux, P., Labhilili, M., Baum, M. and Rivoal R. (1998). Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. Cahiers Agric., 7 : 510-515.
- Neelam P., Kumar P. and Neetu S., (2010). Performance Evaluation of Aquacrop in Simulating Potato Yield Under Varying Water Availability Conditions. Senior Scientist and Research Associates Water Technology Centre, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi –110012, India.
- Parr I. F., Stewart B. A., Homick S. B. and Singh R. P. (1990). Improving the sustainability of dry land farming systems: A global perspective. P. 1-8 In Singh R. P., Parr J. F., et Stewart B. A. (eds). Dry land Agriculture Strategies for sustainability, Adv. Soil Sci. 13 : Springer-Verlag, New York.

- Pasquale De Vita., Orazio N., Franca N., Cristiano,P.,Carmen R., Natale F. and Luigi C. (2007). Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *Europ. J. Agronomy*, pp : 39–53.
- Passioura, J., (1977). Grain yield, harvest index and water use of wheat. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.*, 43 : 117–120.
- Passioura J.B. (1996). Simulation Models : Science, Snake Oil, Education or Engineering? *Agronomy Journal*, 88 : 690 - 694.
- Passioura J. (2004). Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management. In proceedings of the 4th International Crop Science Congress"New directions for a diverse planet" Brisbane, Australia. 12 pages.
- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C. and Fereres E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447.
- Rebetzke G.J, Richards R.A., Fettell N.A., Long M., Condon A.G., Forrester R.I and Botwright T.L. (2007). Genotypic increases in coleoptile length improves stand establishment, vigour and grain yield of deep-sown wheat. *Field Crops Research*, 100: 10–2.
- Rejeb M.N. and Ben Salem M. (1993). Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 22: 49-52.
- Reynolds M.P., Balota M., Delgado M.I.B., Amani I. and Fisher R.A. (1994). Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Aust.J. Plant physiol.*, 21:717-730.
- Richards RA., Rebtzke GJ., Van Herwaardlen AF., Duggand BL. and Condon AG. (1997). Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture*, 36: 254-266.
- Richards R.A., Rebetzke G.J., Condon A.G. and Van Herwaarden A.F. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci*, 42: 111-21.
- Robert D., Gate P. and Couvreur F. (1993). Les stades du blé. Editions ITCF.
- Saulescu N.N. and Kronstad W.E. (1995). Growth Simulation Output for Detection of Differential Response to Environmental Factors. *Crop Science* 35 : 773-778.

- Shorter R., Lawn R.J. and Hammer G.L. (1991). Improving genotypic adaptation in crops - A role for breeders, physiologist and modellers. *Experimental Agriculture*, 27 : 155-175.
- Siddique K. H. M., Belford R.K., Perry M.W. and Tennant D. (1989). Growth development and light interception of old and modern wheat varieties in Mediterranean environment. *Aust. J. Agri. Res.*, 40: 473-487.
- Simane B., Peacock J.M. and Struik P.C. (1993). Differences in developmental plasticity and growth rate among droughtresistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*). *Plant soil*, 157: 155–166.
- Simane B., Struik P.C., Nachit M. and Peacock J.M. (1993). Ontogenic analysis of yield components and yield stability of durum wheat in water-limited environments. *Euphytica*, 71 : 211–219.
- Single W.V. and Fletcher R.J. (1979). Resistance of wheat to freezing in the heading stages. *Proc 5th Int Wheat Genet Symp New Delhi, Feb 23-28, 1978* (S Ramanujam, ed) t 1: 188-191.
- Slafer G.A., Andrade F.H. and Satorre E.H. (1993). Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In : Slafer, G.A. (Ed.), *Increase in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. Genetic improvement of field crop.* Marcel Dekker. Inc., New York, USA, pp. 1-68.
- Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M'B. and Zid E. (2005). Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 16(3): 225-229.
- Soltner D. (2005a). *Les grandes productions végétales*. Ed. Collection sciences et techniques agricoles, Paris (20e édition), 472p.
- Soltner D. (2005b). *Les bases de la production végétale (Tome III : La plante et son amélioration)*. Ed. Collection sciences et techniques agricoles, Paris (24e édition), 472 p.
- Sorrells M.E., Diab A. and Nachit M. (2000). Comparative genetics of drought tolerance. *Options méditerranéennes série A (Séminaires méditerranéens)*, 40: 191-201.
- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D. and Fereres E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437
- Stöckle C.O., Nelson R.L., (1999). *CropSyst User's Manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.

- Stöckle C.O., Donatelli M. and Nelson R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 289–307. Second special issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.
- Triboi E. (1990). Modèle d’élaboration du poids du grain chez le blé tendre (*Triticum aestivum*). *Agronomie*, 10: 191-200.
- Thorne G.N. and Wood D.W. (1987). Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. *Annals of Botany*.
- Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi saab M., Stöckle C. and Steduto P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agron J.*, 101 : 509-521.
- Triboi E., Rousset M. and Lemerancier E. (1995). Elaboration du poids de grain. *Ecophysiologie du blé*. INRA, pp: 67-100.
- Turner N.C. (1979). Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. In : *Stress Physiology in Crop Plants*, Mussell, H. et Staples, R.C. (éds). Wiley Intersciences, NewYork, pp 303-372.
- Uehara G. and Tsuji G.Y. (1993). The IBSNAT project. In: Penning de Vries, F.W.T., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.), *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 505–513.
- Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L. and Goudriaan J., (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 201–234. Second Special Issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.
- Wang H., McCaig T.N., Delauw R.M., Clarke F.R. and Clarke J.M. (2002). Physiological characteristics of recent Canadian wintered spring wheat cultivars: yield components and dry matter production. *Can. J. Plant Sci.*, 82 : 299-306.
- Waddington S.R., Osmanzai M., Yoshida M. and Ransom JK. (1987). The yield of durum wheats released in Mexico between 1960 and 1984. *Journal of Agricultural Science*, 469–477.
- Whisler F.D., Acock B., Baker D.N., Fye R.E., Hodges H.F., Lambert J.R., Lemmon H.E., McKinion J.M. and Reddy V.R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40 : 141 - 208.
- Willmott C.J., Akleson G.S., Davis R.E., Feddema J.J., Klink K.M., Legates D.R., Odonnell J. and Rowe, C.M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.*, 90 : 8995-9005.

Ykhlef N. (2002). Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mentouri Constantine, 146 pp.

Zhang J., Nguyen H.T., Blum A. (1999). Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *J. Exp. Bot.*, 50: 291-302.

ANNEXES

Annexes

Tableau 1 : l'origine des variétés étudiées.

Variétés	Origine
Oued Zenati	Locale
Bousselam	Locale
Altar	CIMMYT
Mexicali	CIMMYT
Hoggar	Locale
Ofanto	Italie
Belliouni	Locale
Sahel	Introduite

Tableau 2. Matrice de corrélation pour la campagne 2010/2011.

	NE/m2	NG/m2	Bio	RDT	PMG	IR	SH
NE/m2	1,00						
NG/m2	-0,84	1,00					
Bio	-0,53	0,85	1,00				
RDT	0,86	-0,68	-0,60	1,00			
PMG	-0,26	-0,21	-0,23	-0,57	1,00		
IR	0,69	-0,85	-0,95	0,82	-0,08	1,00	
SH	-0,97	0,94	0,65	-0,77	0,03	-0,74	1,00

Tableau 3. Matrice de corrélation pour la campagne 2011/2012.

	NE/m2	NG/m2	Bio	RDT	PMG	IR	SH
NE/m2	1,00						
NG/m2	0,99	1,00					
Bio	-0,56	-0,45	1,00				
RDT	0,95	0,96	-0,36	1,00			
PMG	-0,48	-0,46	0,54	-0,18	1,00		
IR	0,28	0,23	-0,66	-0,04	-0,94	1,00	
SH	-0,80	-0,80	0,55	-0,59	0,90	-0,73	1,00

Tableau 4. Matrice de corrélation pour la campagne 2012/2013.

	NE/m2	NG/m2	Bio	RDT	PMG	IR	SH
NE/m2	1,00						
NG/m2	0,81	1,00					
Bio	0,28	0,45	1,00				
RDT	0,82	0,99	0,58	1,00			
PMG	-0,40	-0,63	0,36	-0,49	1,00		
IR	0,64	0,67	-0,36	0,55	-0,94	1,00	
SH	-0,78	-0,36	0,33	-0,32	0,39	-0,68	1,00

Tableau 5. Matrice de corrélation pour la campagne 2013/2014.

	NE/m2	NG/m2	Bio	RDT	PMG	IR	SH
NE/m2	1,00						
NG/m2	0,24	1,00					
Bio	0,82	0,75	1,00				
RDT	0,28	1,00	0,78	1,00			
PMG	0,79	0,71	0,97	0,73	1,00		
IR	-0,16	0,90	0,41	0,89	0,33	1,00	
SH	-0,59	-0,93	-0,94	-0,94	-0,89	-0,70	1,00

Tableau 6. Analyse de variance de la compagne 2010/2011

PMG					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	3.149075	1.0496917	0.5263364	.6751
Gén	3	95.652875	31.884292	15.987421	.0006 ***
Error	9	17.949025	1.9943361		
NE/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	586.36245	195.45415	1.2689779	.3423
Gén	3	6121.7225	2040.5742	13.248343	.0012 **
Error	9	1386.22375	154.02486		
NG/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	1363091638	4.54364e8	0.9453154	.4587
Gén	3	1330234352	4.43411e8	0.9225286	.4684 ns
Error	9	4325831394	4.80648e8		
RDT					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	30.953925	10.317975	1.1529727	.3798
Gén	3	106.289275	35.429758	3.959066	.0471 *
Error	9	80.541175	8.9490194		
IR					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	54.76696875	18.255656	1.6026166	.2562
Gén	3	465.7027688	155.23426	13.627612	.0011 **
Error	9	102.5204062	11.391156		
Bio					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	3	246.203325	82.067775	2.0829797	.1728
Gén	3	850.055675	283.35189	7.1918149	.0092 **
Error	9	354.592975	39.399219		

Tableau 7. Analyse de variance de la compagne 2011/2012

PMG					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	49.75311667	24.876558	0.9913686	.4246
Géno	3	116.5548667	38.851622	1.5482961	.2964 ns
Error	6	150.5588833	25.093147		
NE/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	16887.5	8443.75	4.2708114	.0702
Géno	3	1 7906.25	5968.75	3.0189673	.1157 ns
Error	6	11862.5	1977.0833		
NG/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	20937106.17	10468553	4.7709452	.0575
Géno	3	31407978.25	10469326	4.7712975	.0497 *
Error	6	13165382.5	2194230.4		
RDT					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	556.9465167	278.47326	5.4457862	.0448
Géno	3	456.3893667	152.12979	2.97503	.1186 ns
Error	6	306.8132833	51.135547		
Bio					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	924.875	462.4375	3.1597153	.1155
Géno	3	151.0625	50.354167	0.3440569	.7950 ns
Error	6	878.125	146.35417		
IR					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	21218.08725	10609.044	0.7595002	.5081
Géno	3	48122.05438	16040.685	1.1483507	.4031 ns
Error	6	83810.72616	13968.454		

Tableau 8. Analyse de variance de la compagne 2012/2013

PMG					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	203.1188167	101.55941	6.5349398	.0311
Géno	3	49.54683333	16.515611	1.0627132	.4320 ns
Error	6	93.24591667	15.540986		
NE/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	4716.666667	2358.3333	0.22841	.8024
Géno	3	10956.25	3652.0833	0.3537127	.7886 ns
Error	6	61950	10325		
NG/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	11319.94327	5659.9716	0.3891868	.6935
Géno	3	749752.4222	249917.47	17.184642	.0024 **
Error	6	87258.4266	14543.071		
RDT					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	156.8728667	78.436433	1.4581693	.3047
Géno	3	1204.705025	401.56834	7.4653398	.0189 *
Error	6	322.7462	53.791033		
Bio					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	239.0416667	119.52083	0.2426443	.7919
Géno	3	6234.166667	2078.0556	4.2187478	.0633 ns
Error	6	2955.458333	492.57639		
IR					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	73.3046	36.6523	0.530069	.6138
Géno	3	510.4527583	170.15092	2.4607387	.1603 ns
Error	6	414.8776667	69.146278		

Tableau 9. Analyse de variance de la compagne 2013/2014

NE/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	3717.764867	1858.8824	3.6687731	.0910
Géno	3	4272.188892	1424.063	2.8105941	.1302 ns
Error	6	3040.061133	506.67686		
NG/m2					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	15776.12645	7888.0632	2.6095399	.1530
Géno	3	28953.09029	9651.0301	3.192767	.1053 ns
Error	6	18136.67588	3022.7793		
Bio					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	21.49606667	10.748033	1.3143565	.3362
Géno	3	133.2715583	44.423853	5.4325082	.0381 *
Error	6	49.06446667	8.177411		
RDT					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	13.07861667	6.5393083	1.5318416	.2901
Géno	3	34.08855833	11.362853	2.6617632	.1420 ns
Error	6	25.61351667	4.2689194		
PMG					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	29.59706667	14.798533	1.2812583	.3441
Géno	3	39.656	13.218667	1.1444733	.4044 ns
Error	6	69.3	11.55		
IR					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Blocks	2	1153.66145	576.83072	3.2989089	.1080
Géno	3	1022.499158	340.83305	1.9492325	.2231 ns
Error	6	1049.130017	174.855		