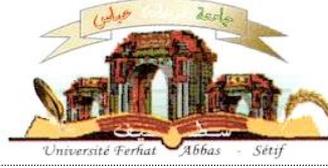


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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 D'AGRONOMIE

N°...../SNV/2019

THÈSE

Présentée par

MAAMRI Khelifa

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCE

Filière: AGRONOMIE

Spécialité: PRODUCTION VÉGÉTALE

THÈME

**Modélisation de la productivité du blé dur en milieu semi aride en
utilisant le programme « Aqua-Crop »**

Soutenue publiquement le : 13 /06/2019

DEVANT LE JURY

Président	BENMAHAMMED Amar	Pr. UFA Sétif 1
Directeur	HAFSI Miloud	Pr. UFA Sétif 1
Examineurs	ALATOU Djamel	Pr. UM Constantine
	KARA Youcef	Pr. UM Constantine
	BAHLOULI Faycel	Pr. UMB M'sila
	BENIOU Ramdane	Pr. UMB M'sila

*Laboratoire Amélioration et Développement de la Production Végétale et Animale
« L.A.D.P.V.A. »*

REMERCIEMENTS

Louanges à ALLAH, le tout puissant et le miséricordieux qui m'a guidé et m'a donné la volonté, la patience et le courage pour achever ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse le Professeur **HAFSI Miloud**, de l'université Sétif -1, qui m'a fait l'honneur de diriger cette recherche. J'ai apprécié les qualités d'un homme de science mais aussi des qualités humaines qui m'ont permis de travailler en toute sérénité et confiance. Je lui suis particulièrement reconnaissant et redevable.

Veillez bien trouver ici l'expression profonde de mon estime.

Mes vifs remerciements vont au Professeur **BENMAHAMMED Amar** de l'université Sétif-1 qui m'a fait l'honneur de présider le jury et à Messieurs ; les Professeurs **ALATOU Djamel** et **KARA Youcef** de l'université Mentouri de Constantine et les Professeurs **BAHLOULI Faycel** et **BENIOU Ramdane** de l'université de M'sila d'avoir pris sur leur temps pour lire, examiner et juger ce modeste travail.

Mes vifs remerciements vont également à l'équipe de l'INRAA Sétif et plus spécialement **Dr Guendouz Ali** et **Dr Hannachi Abderrahmane**, à mon collègue à l'université MBI B.B.Arreridj **Dr Fellahi Zine El Abidine** et au doctorant **Moumni Lyes** pour leurs aide, leurs conseils et leurs savoir et savoir faire dont ils m'ont toujours fait part.

Je remercie tous ceux qui ont, directement ou indirectement, contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Mon dévouement total et tous mes respects vont à mes parents, qu'ils trouvent ici le fruit de leur éducation.

Mon affection et ma profonde reconnaissance à ma chère épouse **Iméne**, pour son soutien sans faille, sa grande indulgence, et sa compréhension.

Enfin, je dédie cette thèse à ma source d'amour et d'affection, mes adorables enfants ; **Nourane, Dine, Yakine et Moubine**.

A toute ma famille et à tous mes amis, je dédie ce travail.

Khelifa



ملخص: نمذجة إنتاجية القمح الصلب في بيئة شبه جافة باستخدام برنامج "Aqua-Crop"

نماذج المحاكاة التي توضح تأثير المياه على إنتاجية المحاصيل ، هي أدوات مفيدة لتحسين تسيير استخدام المياه. طورت منظمة الأغذية والزراعة نموذجًا خاصًا بالماء لاستخدامه كأداة في التخطيط وتحليل السيناريوهات في مواسم ومواقع مختلفة. الهدف من هذه الدراسة هو التحقق من قدرة نموذج AquaCrop على محاكاة السلوك الزراعي للقمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) تحت الظروف شبه الجافة في شرق الجزائر. تم تقييم نموذج AquaCrop ببيانات تجريبية ميدانية تم جمعها خلال خمسة مواسم زراعية (2010-2016) حيث تراوح إجمالي الإجهاد المائي بين 20% في مرحلة النهوض- التسييل وصولاً إلى 66% في مرحلة التسييل- النضج. أثبتت نتائج هذه الدراسة كفاءة نموذج Aqua Crop لتقييم الإجهاد المائي. كانت نتائج المؤشرات الاحصائية مثل متوسط جذر مربع الخطأ (RMSE) ، متوسط الخطأ المطلق (AAE) ، مؤشر الاتفاق (d) وخطأ التنبؤ (Pe) التوالي للكتلة الحيوية النهائية. تمكّن نموذج AquaCrop من محاكاة مؤشر الحصاد بدقة حيث أعطى مؤشر الاتفاق (d) = 0.76 ، RMSE و 9.84 AAE و 7.59 على التوالي. يمكن لنموذج AquaCrop قياس كمية المياه بشكل فعال كما يمكن استخدامه لتسيير المياه لتحسين إنتاجية القمح. إن بساطته نظرًا للحد الأدنى من بيانات الإدخال المطلوبة والتي يمكن الحصول عليها وجمعها بسهولة ، يمكن أن يجعله سهل الاستخدام للمستعملين.

الكلمات المفتاحية: نموذج AquaCrop ؛ القمح الصلب؛ ظروف شبه الجافة ؛ الإجهاد المائي ؛ محصول الحبوب.

Résumé : Modélisation de la productivité du blé dur en milieu semi aride en utilisant le programme « Aqua-Crop »

Les modèles de simulation qui illustrent les effets de l'eau sur le rendement des cultures, sont considérés comme des outils utiles pour améliorer la gestion de l'eau et optimiser l'efficacité de son utilisation. La FAO a récemment mis au point un modèle axé sur l'eau nommé AQUACROP. Cet outil d'aide à la décision, permet la planification et l'analyse de scénarios dans différentes saisons et dans divers endroits avec une sophistication limitée. L'objectif de cette recherche est de valider le modèle AQUACROP pour sa capacité à simuler la performance du blé (*Triticum durum Desf.*) dans les conditions semi-arides de l'Est algérien. Ce modèle a été évalué à l'aide de données expérimentales sur le terrain, recueillies au cours de cinq campagnes culturales (2010-2016) où le stress hydrique total varie de 20% au stade tallage-épiaison à 66% au stade épiaison-maturité. Les résultats de cette étude ont prouvé l'efficacité du modèle Aqua Crop pour quantifier le stress hydrique. Les résultats des indices de fiabilité tels que, l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (AAE), l'indice d'accord (d) et l'erreur de prédiction (Pe) ont été respectivement de : 1,71, 1,48, 0,77 et 19,25% pour le rendement grainier; et de : 2,79, 2,58, 0,33 et 8,57% respectivement, pour la biomasse finale aérienne. AquaCrop a été capable de simuler avec précision l'indice de récolte avec un $d = 0,76$, RMSE et AAE de 9,84 et 7,59, respectivement. Le modèle AquaCrop est alors adéquat pour quantifier le stress hydrique et peut être utilisé dans l'exploration des options de gestion afin d'améliorer la productivité du blé à l'eau. Sa simplicité, en raison de ses données d'entrée minimales requises, qui sont facilement disponibles ou collectées, le rend convivial pour les utilisateurs.

Mots clés: modèle AquaCrop, blé dur; Conditions semi-arides; stress hydrique; Rendement en grains.

Abstract: Modeling the productivity of durum wheat in a semi-arid environment using the "Aqua-Crop" program

Simulation models that clarify the effects of water on crop yield, are useful tools for improving farm level water management and optimizing water use efficiency. FAO recently developed a water-driven model for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations with limited sophistication. The objective of this study is to validate the AquaCrop model for its ability to simulate wheat (*Triticum durum* Desf.) performance under semi-arid conditions in East of Algeria. The AquaCrop model was evaluated with field experimental data collected during five cropping seasons (2010-2016) where total water stress ranged between 20% at Emergence-Heading stage to 66% at Heading-Maturity stage. The results of this study proved the efficiency of the Aqua Crop model to quantify the water stress. The results of reliability indices such as Root Mean Square Error (RMSE), Average Absolute Error (AAE), Index of agreement (d), and Prediction error (Pe) were 1.71, 1.48, 0.77 and 19.25 % respectively for grain yield; and 2.79, 2.58, 0.33 and 8.57 % respectively for final above-ground biomass. The AquaCrop model was able to accurately simulate harvest index giving a d = 0.76, RMSE and AAE of 9.84 and 7.59, respectively. The AquaCrop model can adequately quantify water stress and can be used to explore management options to improve wheat water productivity. Its simplicity due to its required minimum input data, which are readily available or can easily be collected, can make it user-friendly for users.

Key words: AquaCrop model; Durum wheat; Semi-arid conditions; water stress; Grain yield.

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Explication
AAE	: Average Absolut error
ANOVA	: Analysis of Variance
Bio	: Biomasse aérienne.
CC	: Capacité au champ
CIC	: Conseil International des Céréales
CIMMYT	: Centro International de Mejoramiento de Maiz Y Trigo.
d	: Indice d'agrément
ET	: Evapotranspiration.
ETc	: Evapotranspiration potentielle de culture.
ETm	: Evapotranspiration maximale.
ETo	: Evapotranspiration de référence.
ETP	: Evapotranspiration potentielle.
ETR	: Evapotranspiration réelle.
FAO	: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
H	: Horizon.
Ha	: Hectare.
ICARDA	: Centre international de recherche agricole dans les zones arides
INRAA	: Institut National de la Recherche Agronomique Algérie
IR	: Indice de récolte.
ITGC	: Institut Technique des Grandes Cultures
Ks	: Coefficient de stress.
MADR	: Ministère de l'agriculture et du développement rural
NE/m ²	: Nombre d'épis par mètre carré
NG/E	: Nombre de grains par épi
NG/m ²	: Nombre de grains par mètre carré
NP/m ²	: Nombre de plants par mètre carré
O _i	: Valeur observée
ONFAA	: Observatoire National des Filières Agricoles et Agroalimentaires
P	: Pluie
PE	: Potential Error
PMG	: Poids de mille grains
PPDS	: Plus petite différence significative
RDT	: Rendement grains
RMSE	: Root mean square error
S _i	: Valeur simulée
T	: Transpiration

LISTES DES FIGURES :

Numéro	Titre de la figure	Page
Figure 01:	Principaux flux mondiaux de blé.	09
Figure 02 :	Evolution de la superficie récoltée (ha) et de la production du blé en Algérie.	11
Figure 03 :	Importations Algériennes du blé.	11
Figure 04 :	Evolution du rendement du blé (q^x /ha) en Algérie.	14
Figure 05 :	Etapes de la démarche de modélisation.	31
Figure 06 :	Organigramme schématique d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier.	38
Figure 07:	Les relations fonctionnelles entre les différents composants du modèle.	45
Figure 08 :	L'organigramme des différents modules du modèle AquaCrop.	46
Figure 09:	Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer.	47
Figure 10 :	Pluviométrie saisonnière des campagnes 2010-2016.	54
Figure 11 :	Températures mensuelles du cycle végétatif des campagnes 2010-2016.	55
Figure 12 :	Diagramme de la variation de la température et des précipitations des campagnes 2010-2016.	56
Figure 13:	Relation entre le nombre d'épis m^{-2} avec le nombre de grain m^2 (A) et avec le poids de mille grains (B).	59
Figure 14 :	Evolution du nombre de grain/ m^2 durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).	60
Figure 15 :	Relation entre le nombre de grains m^{-2} avec le rendement (A) et avec l'indice de récolte (B).	61
Figure 16 :	Histogramme de la moyenne du poids de mille grains des variétés étudiées.	63
Figure 17 :	Histogramme de la moyenne du rendement en grain des variétés étudiées.	66
Figure 18 :	Evolution de la biomasse aérienne durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).	68
Figure 19 :	Histogramme de la moyenne de la biomasse aérienne des variétés étudiées.	68
Figure 20 :	Evolution de l'indice de récolte durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).	70
Figure 21 :	Histogramme de la moyenne de l'indice de récolte des variétés étudiées.	71
Figure 22 :	Classification hiérarchique des campagnes étudiées sur la base des variables mesurées.	73
Figure 23 :	Valeurs relatives moyennes (% valeur maxi) des variables mesurées chez les trois groupes de campagnes.	74

Figure 24 :	Classification hiérarchique des génotypes évalués sur la base des variables mesurées.	74
Figure 25 :	Valeurs relatives moyennes (% valeur maxi) des variables mesurées chez les deux groupes de génotypes.	75
Figure 26:	Durée des phases phénologiques durant les cinq campagnes d'étude.	76
Figure 27:	Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase semis-tallage entre les campagnes.	77
Figure 28:	Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade semis-tallage.	78
Figure 29 :	Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase semis-levée.	78
Figure 30 :	Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2010-2011.	79
Figure 31 :	Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2011-2012.	80
Figure 32 :	Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2012-2013.	80
Figure 33 :	Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2015-2016.	80
Figure 34:	Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase tallage-épiaison entre les campagnes.	82
Figure 35:	Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade tallage-épiaison.	82
Figure 36 :	Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase tallage-épiaison.	83
Figure 37:	Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase épiaison-maturité entre les campagnes.	85
Figure 38:	Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade épiaison-maturité.	86
Figure 39 :	Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase épiaison-maturité.	87
Figure 40:	Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant le cycle cultural entier.	89
Figure 41 :	Relation entre le rendement et le nombre de jours durant le cycle cultural entier.	89
Figure 42:	Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant le cycle cultural entier entre les campagnes.	89
Figure 43:	Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours cycle cultural entier.	90
Figure 44:	Moyenne du stress hydrique durant les trois phases de développement.	91
Figure 45 :	Écart par rapport aux valeurs moyennes du rendement en grains (GY),	92

	du poids de mille grains (TKW) et du stress hydrique total (TWS) au cours de nos cinq saisons de culture (2010-2016).	
Figure 46 :	Relation entre le coefficient de stress avec le rendement (A) et avec le poids de mille grains (B) durant les campagnes d'études.	92
Figure 47:	Écart par rapport aux valeurs moyennes du rendement en grains (RDT), du poids de mille grains (PMG) et du stress hydrique total (Ks) entre les génotypes.	93
Figure 48 :	Relation entre le coefficient de stress avec le rendement (A) et avec le poids de mille grains (B) entre les génotypes.	94
Figure 49 :	Moyenne du rendement grain observé et simulé au cours des campagnes.	95
Figure 50 :	Moyenne du rendement grain observé et simulé entre génotypes.	95
Figure 51 :	Relation entre le rendement simulé et observé.	97
Figure 52 :	Moyenne de la biomasse aérienne observée et simulée au cours des campagnes.	98
Figure 53 :	Moyenne de la biomasse aérienne observée et simulée des génotypes.	99
Figure 54 :	Relation entre la biomasse aérienne simulée et observée.	100
Figure 55 :	Moyenne de l'indice de récolte observé et simulé au cours des campagnes.	101
Figure 56 :	Moyenne de l'indice de récolte observé et simulé des génotypes.	101
Figure 57 :	Relation entre l'indice de récolte simulé et observé.	103

LISTE DES TABLEAUX :

Numéro	Titre du tableau	Page
Tableau 01 :	Superficies emblavées, moyennes de 10 ans, en blé dur dans le monde	06
Tableau 02 :	Moyennes décennales (2006-2015) de la production (tonnes) et du rendement à l'hectare (tonne/ha) du blé dur des principaux pays producteurs	07
Tableau 03 :	Production des céréales en Algérie	09
Tableau 04 :	Evolution de la superficie récoltée, du rendement et de la production de la culture du blé en Algérie de 2010 à 2016	10
Tableau 05 :	Importations Algériennes des céréales (blé dur, blé tendre, orge et maïs) en quantité (tonne) et en valeur (millions USD) de l'année 2015 et 2016	12
Tableau 06:	Consommation par tête de blé (Kg) dans quelques pays, 1961-2003.	12
Tableau 07:	Principaux caractères impliqués dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse	20
Tableau 08 :	Nom et origine des variétés semées durant l'expérimentation	40
Tableau 09 :	Paramètres utilisés dans la calibration du modèle AquaCrop	50
Tableau 10 :	Carré moyen de l'analyse de la variance des composantes du rendement	57
Tableau 11 :	Valeurs moyennes des composantes du rendement pour les campagnes et géotypes.	58
Tableau 12 :	Coefficient de corrélation entre le PMG et les caractères mesurés	64
Tableau 13:	Carré moyen de l'analyse de la variance des variables post-récolte	64
Tableau 14 :	Valeurs moyennes des paramètres post-récolte mesurés pour les campagnes et géotypes.	65
Tableau 15:	Coefficient de corrélation entre la biomasse et les caractères mesurés	69
Tableau 16:	Coefficient de corrélation entre l'indice de récolte et les caractères mesurés	72
Tableau 17:	Valeurs caractéristiques des groupes identifiés sur la base des variables mesurées.	72
Tableau 18:	Variation du stress hydrique durant la première phase (semis-tallage).	77
Tableau 19 :	Variation du stress hydrique durant la deuxième phase (tallage - épiaison).	81
Tableau 20 :	Variation du stress hydrique durant la troisième phase (épiaison-maturité).	84
Tableau 21 :	Variation du stress hydrique durant le cycle cultural entier.	88
Tableau 22:	Valeurs de la simulation des rendements et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle	96
Tableau 23 :	Valeurs de la simulation de la biomasse aérienne et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle	99
Tableau 24:	Valeurs de la simulation de l'indice de récolte et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle	102

TABLE DES MATIERES :

Résumé	I
Liste des abréviations.....	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Introduction.....	01
Chapitre I- Revue bibliographique	
1- Généralités sur le blé	04
1-1- La culture du blé dur: Historique, Origine et Classification	04
1-2- Importance de la culture du blé dur	05
1-2-1- Dans le monde	05
1-2-2- En Algérie	09
1-2-2-1- Place du blé dans la consommation alimentaire des ménages	12
1-2-2-2- Evolution de la culture céréalière au niveau national	13
1-3- La spécificité du climat des hauts plateaux	14
2- Les contraintes abiotiques et leurs effets sur le blé	16
2-1- L'éclairement	16
2-2- La température	16
2-2-1- Les basses températures	16
2-2-2- Les températures élevées	17
2-3- Le stress hydrique	18
3- Mécanisme d'adaptation aux stress	19
3-1- Adaptations phénologiques.....	21
3-2- Adaptations morphologiques	21
3-3- Adaptations physiologiques	23
4-Simulation et modélisation	28
4-1- Importance de l'outil de simulation	28
4-2- Classification générale des modèles	29
4-3- La démarche dans la modélisation	30
4-4- Les modèles de culture	32
4-4-1- Description, classification et utilisation	32
4-4-2- Chronologie et evolution	36

4-4-3- Les qualités recherchées d'un modèle de culture	36
4-4-4- Organisation et conception	37

Chapitre II : Matériel et méthodes

1- Description du site expérimentale	39
2- Dispositif expérimental	39
3- Matériel végétal	40
3-1- Description des variétés	40
4- Mesures et notations effectuées	42
4-1- Paramètres climatiques	42
4-2- Paramètres phenologiques	42
4-3- Paramètres agronomiques	42
5- Logiciel Aqua Crop	43
5-1- Description du modele AquaCrop	43
5-2- Les relations entre les différents composants du modèle	44
5-3- Les données d'entrées.....	46
5-3-1- Données climatiques	47
5-3-2- Caractéristiques des cultures.....	48
5-3-3- Caractéristiques du sol	48
5-3-4- Pratiques de gestion	48
5-4- Calibration du modèle	49
5-5- Evaluation du modèle	50
6- Analyses statistique	52

Chapitre III : Résultats et discussion

1- Etudes des paramètres météorologiques	53
1-1- La pluviométrie	53
1-2- La température	54
2- Etude du comportement agronomique	56
2-1- Nombre d'épi par m ² (NE/m ²)	57
2-2- Nombre de grains par m ² (NG /m ²)	59
2-3- Le poids de mille grains (PMG)	62
2-4- Rendement grain (RDT)	64
2-5- La biomasse aérienne (BIO)	67
2-6- L'indice de récolte (IR)	70

2-7- Caractérisation des campagnes et typologie variétale	72
3-Quantification du stress hydrique	76
3-1- Stress hydrique au cours de la première phase (semis-tallage)	76
3-2- Stress hydrique durant de la deuxième phase (tallage - épiaison)	81
3-3- Stress hydrique au cours de la troisième phase (épiaison-Maturité)	84
3-4- Stress hydrique durant le cycle cultural entier.....	87
3-5- L'effet direct du stress hydrique sur le rendement et ses composantes...	90
4- Simulation et évaluation du modèle Aqua-Crop	95
4-1- Rendement en grains (RDT)	95
4-2- Biomasse aérienne (BIO)	98
4-3- Indice de récolte (IR)	101
Conclusion générale.....	104
Références bibliographiques	108
Annexe.....	127

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

La demande de céréales devrait augmenter à l'avenir à mesure que la population mondiale augmente. Ainsi, avec une population mondiale estimée à 9,6 milliards d'ici 2050, la production de blé aura une influence décisive sur la sécurité alimentaire et l'économie mondiale dans les décennies à venir (USDA Foreign Agricultural Service, 2014).

En Algérie, le blé dur est une culture ancestrale dont le produit constitue la base de l'alimentation de la population sous diverses formes notamment semoule et pâtes (Hannachi, 2013). Cependant, et malgré l'augmentation de sa production, passant de 1,35 millions de tonnes moyenne de la période en 2000-2008, à 2,1 millions de tonnes, moyenne de la période 2009-2015 ; celle-ci demeure loin de couvrir les besoins du pays, estimés à 8 millions de tonnes par an (Benbelkacem, 2013). Le faible niveau des rendements explique en grande partie cette insuffisance en matière de production, puisque les superficies allouées à cette culture varient peu dans le temps (Benbelkacem, 2013). Hafsi (2016) a constaté une stagnation du rendement de blé dur dans les hautes plaines sétifiennes caractérisées par de fréquentes vagues de sécheresse et de hautes températures.

Par ailleurs, le blé constitue l'une des cultures céréalières les plus importantes au monde, cultivée dans les régions arides et semi-arides du monde (Akbar *et al.*, 2001, Tunio *et al.*, 2006). Les estimations actuelles indiquent en effet, que 25% des terres agricoles du monde sont maintenant affectées par le stress hydrique qui représente l'un des stress environnementaux les plus dévastateurs réduisant la productivité du blé dans de nombreuses parties du monde (Ahmad *et al.*, 2003).

Les résultats obtenus en matière d'amélioration génétique pour la tolérance à la sécheresse montrent les nombreuses difficultés de sélection pour le rendement ; ce qui a conduit les chercheurs à développer des approches plus analytiques et plus explicatives basées sur le principe de caractères phéno-morpho-physiologiques de tolérance à la sécheresse chez les variétés productives. Ces dernières montrent que l'utilisation de ces caractères, comme critères de sélection indirecte dans les programmes d'amélioration génétique, peut être considérée comme une démarche efficace (Hafsi, 2001).

En outre, les cultures démontrent diverses réponses morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires pour s'adapter au stress de la sécheresse. Les stades végétatifs et reproductifs des plantes sont intensément influencés par le stress hydrique (Nezhadahmadi *et al.*, 2013).

Aussi, besoins en eau des cultures sont liés à des périodes sensibles à l'humidité. Salter et Goude (1967) ont défini ces périodes telles que «certaines phases de développement dans lesquelles la plante est, ou apparait par sa réponse observée, plus sensible aux conditions d'humidité qu'à d'autres stades de développement». Si ces périodes sensibles à l'humidité pouvaient être identifiées pour la culture de blé dans des conditions de pleins champs, cela aurait une implication importante pour les pratiques d'irrigation. Donc, une utilisation efficace et rationnelle de l'eau est indispensable dans des conditions de pénurie d'eau.

Le manque d'eau reste également, le facteur le plus limitant de la productivité des cultures, particulièrement la culture de blé et afin de faire face à ce défi, l'amélioration de l'utilisation de l'eau s'avère nécessaire. Dans ce contexte, des travaux réalisés depuis plusieurs décennies sur l'effet de stress hydrique et l'efficacité d'utilisation de l'eau, s'orientent essentiellement, soit vers des approches expérimentales, soit vers des approches basées sur des modèles (Aouade, 2012).

L'utilisation d'outils de simulation pourra améliorer la compréhension du comportement variétal en condition de contraintes hydriques et aider à déterminer les phases de stress avec exactitude et leur impact sur le potentiel de production (Steduto *et al.*, 2009). Ils permettent d'estimer les besoins en eau de la culture et donc de mieux gérer les ressources hydriques. La prévision du rendement final permet aux agriculteurs de réorienter la conduite des cultures. Les modèles permettent également aux décideurs d'avoir une idée préalable sur le manque ou l'excès d'un produit agricole lorsque des études régionales sont réalisées (Andarzian *et al.*, 2011).

La FAO a mis au point un modèle de culture concernant la réponse du rendement à l'eau nommé « AquaCrop ». Ce modèle de simulation de la productivité des cultures par rapport à l'eau résulte de la révision du document d'irrigation et de drainage n ° 33 de la FAO, intitulé « Réponse du rendement à l'eau » (Doorenbos et Kassam, 1979).

AquaCrop est utilisé comme un outil d'aide à la décision dans la planification et l'analyse de scénarios dans différentes saisons et lieux (Steduto *et al.*, 2009, Hsiao *et al.*, 2009). Ce modèle, simule davantage, la réponse du rendement des cultures à l'eau, particulièrement là où elle est facteur clé limitant la production agricole.

Pour l'étalonnage du paramétrage, on modifie, d'une part, les paramètres du modèle et même le codage afin d'obtenir une prédiction précise par rapport aux données observées. D'autre part, la validation est le processus par lequel le modèle est testé sur des données indépendantes, sans aucune modification des paramètres ou du code du modèle (Nain et Kersebaum, 2007; Andarzian *et al.*, 2008; Salazar *et al.*, 2009).

Les objectifs visés dans le cadre de cette recherche sont : (1) décrire le comportement agronomique de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.), choisies en raison de leurs différences concernant les performances de productivité et leurs tolérances au stress hydrique, à travers la réalisation des essais expérimentaux sur plusieurs campagnes agricoles ; (2) L'évaluation de la performance du modèle AquaCrop pour quantifier le stress hydrique dans les conditions semi-arides de l'est de l'Algérie et (3) valider et vérifier la bonne prédiction des variables d'état du modèle AquaCrop sur un jeu de données. L'évaluation est ainsi, réalisée sur les critères biomasse aérienne de la culture, l'indice de récolte et le rendement grain.

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I- Revue bibliographique

1- GENERALITES SUR LE BLE

1-1- LA CULTURE DU BLE DUR: HISTORIQUE, ORIGINE ET CLASSIFICATION

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, diploïde et tétraploïdes, remontant au VII^{ème} millénaire avant J.C ont été découverts sur des sites archéologiques au Proche Orient (Harlan,1975). Ces données archéologiques fournissent des preuves tangibles de la synchronie entre les débuts de la culture des blés et l'organisation de sociétés sédentaires, marquant ainsi la fin de la période nomade au cours de laquelle chasse et cueillette constituent les principaux moyens de subsistance (Diamond, 2002). En effet, l'histoire de l'homme est intimement liée à celle des céréales qu'il a très tôt appris à domestiquer, cultiver et sélectionner (Bonjean et Picard, 1991).

Les espèces de blé tirent leur origine génétique de croisements naturels entre *Triticum monococcum*, *Triticum urartu* et des espèces sauvages apparentées appartenant à *Aegilops* (*Aegilops speltaoides*). *Triticum monococcum* et *Triticum urartu* sont les premières formes de céréales cultivées, elles sont de constitution génomique $2n = 14$. (Feldman et Sears, 1981).

Les analyses cytologiques et moléculaires laissent croire que les sous-espèces de *T. turgidum* seraient issues de l'hybridation naturelle de *Triticum monococcum* L. subsp. *boeoticum* (Boiss.) (synonyme : *Triticum urartu* : AA) avec une espèce de blé diploïde inconnue contenant le génome B (Feldman, 2001). Selon Kimber et Sears (1987), une ou plusieurs des cinq espèces diploïdes de la section *Sitopsis* du genre *Triticum* pourraient avoir fournies le génome B aux blés polyploïdes. D'après l'analyse moléculaire, le génome de *T. speltaoides* s'apparente plus au génome B du blé dur et du blé tendre (Talbert *et al.*, 1995; Khlestkina et Salina, 2001). En outre, l'analyse de l'ADN des chloroplastes montre que *T. speltaoides* est probablement le donneur maternel du blé dur (Wang *et al.*, 1997). Le résultat de cette hybridation naturelle est l'amidonnier sauvage (*Triticum turgidum* ssp. *dicocoides* (Korn.) Thell) qui a été domestiqué plus tard sous la forme du blé amidonnier (*Triticum turgidum* ssp. *dicocum* (Schrank) Thell), qui s'est répandu du Proche-Orient jusqu'aux grandes régions productrices de la Méditerranée et du Moyen-Orient, y compris en Égypte et en Éthiopie (Bozzini, 1988). Des milliers d'années de culture et de sélection ont abouti à la formidable variabilité des blés tétraploïdes issus de l'amidonnier sauvage. Un certain nombre

de sous-espèces ont donc été caractérisées, principalement d'après les caractères morphologiques. Parmi tous les blés tétraploïdes cultivés, *T. turgidum* ssp. *durum* est de loin le plus important. (Slageren Van, 1994)

Le blé dur s'est diversifié 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 avec des caractéristiques phénologiques, morphologique et physiologiques particulières (Bozzini, 1988).

Cette diversification morphologique a été mise à profit en sélection. Notamment dans la recherche de gènes intéressants tels ceux qui contrôlent la résistance aux basse températures, plus présents chez les prôles Européens. Ceux qui contrôlent la durée du cycle (précocité aux stades épiaison et maturité), chez les prôles Syriens et Jordaniens et ceux contrôlant la grosseur et la vitrosité du grain, chez les prôles Méditerranéens (Monneveux, 1991).

Selon Charles (2010), le genre *Triticum* appartient à la tribu des Triticées, la sous-famille des *Pooideae* au sein de la famille des Poacées et plus largement au groupe des angiospermes monocotylédones. Les espèces du genre *Triticum* sont des herbacées annuelles à feuilles alternes. De graine à graine, le cycle du blé se compose d'une période végétative marquée par la production de racines, feuilles et tiges puis d'une phase reproductrice marquée par la formation des épis, des fleurs puis par le remplissage des grains. L'observation du cycle de développement du blé a conduit à l'identification de stades clés du développement décrits et normalisés par différents auteurs selon des échelles de développement comme celle de Zadoks *et al.*, (1974), utilisée pour reconnaître les stades par des modifications d'aspect interne (Différentiation de l'épi : Stade épi 1 cm) et de Jonard et Koller (1950), utilisée pour reconnaître les stades par des changements d'aspect externe (Levée - Montaison).

1-2- IMPORTANCE DE LA CULTURE DU BLE DUR

1-2-1- DANS LE MONDE

A travers le monde, le blé est cultivé dans de différentes conditions climatiques, des latitudes Nord du Canada et de la Chine aux régions Sud de l'Amérique du Sud et de l'Australie. Le blé est adapté à une large gamme de conditions climatiques et pédologique et il est cultivé principalement en conditions pluviales. Il est surtout adapté aux régions tempérées dont les précipitations se situent entre 250 et 1750 mm (Curtis *et al.*, 2002).

Le blé dur est relativement peu produit dans le monde. Ainsi, la production mondiale de blé dur ne constitue en moyenne que quelques 5% de la production totale mondiale, qui a dépassé les 700 millions de tonnes au cours des dernières années ; 20% de la production de blé dur est essentiellement échangée dans le monde (Faostat, 2015).

Selon le (CIC, 2018), la production mondiale de blé a bondi de 2 % d'une année sur l'autre en 2016/17, à 754 millions de tonnes, une hausse de 6 % par rapport à la moyenne quinquennale. La consommation est estimée avoir grimpé de 2 % à un nouveau pic de 736 millions de tonnes, y compris de solides progrès pour l'alimentation humaine et animale, respectivement placées à 499 millions (489 millions l'année précédente) et 151 millions (142 millions). Malgré une demande record, les stocks de report (cumul des campagnes locales respectives de commercialisation) ont augmenté pour la quatrième année consécutive, en hausse de 18 millions de tonnes d'une année sur l'autre, à 242 millions de tonnes.

La moyenne des superficies emblavées en blé dur, des 10 dernières années, de par le monde, est de 16.9 millions d'hectares ce qui représente 7.6% de la superficie totale réservée à la culture des blés. Le Kazakhstan, le Canada, la Turquie, l'Italie et l'Algérie sont les pays qui représentent plus de 50 % de la superficie mondiale du blé dur (Tableau 1).

Tableau 01: Superficies emblavées, moyennes de 10 ans, en blé dur dans le monde (Ammar, 2015)

Pays	Superficie en ha	Pays	Superficie en ha
Kazakhstan	2 280 000	France	429 000
Canada	1 970 000	Mexique	311 000
Turquie	1 670 000	Chine	305 000
Italie	1 417 000	Australie	258 000
Algérie	1 264 000	Ethiopie	248 000
Maroc	982 000	Afghanistan	194 000
Etats Unis	933 000	Iran	175 000
Syrie	901 000	Pakistan	126 000
Inde	693 000	Irak	107 000
Tunisie	669 000	Argentine	89 000
Espagne	635 000	Arabie Saoudite	65 000
Russie	610 000	Egypte	46 000
Grèce	488 000	Chili	13 000

Ce sont dans l'ordre d'indépendance décroissant : l'UE, la Turquie, le Canada et les Etats-Unis qui produisent une part relative de 67%. Les trois pays maghrébins (Maroc, Algérie et la Tunisie) ne partagent qu'environ 11,4% de la production mondiale de blé dur. L'Algérie est le 6^{ème} producteur mondial de blé dur avec 3,4%, derrière le Maroc 5,2% et devant la Tunisie 2,8%. L'UE est le premier producteur mondial de blé dur. La production provient principalement d'Italie, d'Espagne, de France et de Grèce. L'UE est aussi le principal marché de consommation de cette denrée ; depuis le début des années 1990, elle est un importateur net de quantités considérables de blé dur (Kellou, 2008).

Historiquement, la principale zone de culture du blé tétraploïde (*Triticum turgidum*, var. *durum* L.) est la région du pourtour de la méditerranée qui détient près de 80 % des superficies emblavées (Royo *et al.*, 2009). La production du bassin méditerranéen varie considérablement car elle est dépendante de la pluie (Tableau 2). L'Italie est le principal producteur de blé dur avec une moyenne de 4,0 millions de tonnes. La Turquie, la France et l'Algérie suivent avec des moyennes, respectives, de 3.0, 2.0 et 2.0 millions de tonnes (Hannachi, 2013).

Tableau 02: Moyennes décennales (2006-2015) de la production (tonnes) et du rendement à l'hectare (tonne/ha) du blé dur des principaux pays producteurs (Ammar, 2015).

Pays	Production	Rendement	Pays	Production	Rendement
Canada	4 493 000	2.30	Chine	1 245 000	4.10
Italie	4 281 000	3.04	Inde	1 060 000	1.55
Turquie	3 030 000	1.82	Grèce	991 000	2.03
Kazakhstan	2 400 000	1.04	Australie	470 000	1.82
Etats Unies	2 305 000	2.47	Afghanistan	386 000	1.99
France	2 070 000	4.83	Iran	339 000	1.93
Algérie	2 045 000	1.59	Pakistan	331 000	2.63
Syrie	1 962 000	2.15	Ethiopie	321 000	1.38
Mexique	1 772 000	5.67	Egypte	280 000	5.69
Maroc	1 452 000	1.46	Arabie Saoudite	277 000	4.16
Russie	1 315 000	2.16	Irak	222 000	2.35
Espagne	1 287 000	2.03	Argentine	210 000	2.37
Tunisie	1 259 000	1.87	Chili	56 000	4.50

La deuxième grande zone de production est celle des plaines intérieures du nord de l'Amérique du Nord (USA et Canada). Vaste territoire de culture du blé dur qui comprend les Dakotas, le Montana, le Saskatchewan et l'Alberta. La production totale de blé dur, cycle de printemps, de ce territoire se situe chaque année entre 6.5 à 8.0 millions de tonnes. Le Canada est le plus gros producteur mondial de blé dur et la production annuelle varie entre 4,5 à 6 millions de tonnes (Ranieri, 2015).

La demande mondiale de blé devient de plus en plus concurrentielle avec l'augmentation des importations en volume, ainsi que du nombre de pays importateurs. En effet, la carte de la demande mondiale se compose actuellement de trois pôles d'importations qui sont :

- l'Afrique du Nord ;
- le Proche Orient ;
- l'Asie méridionale et l'Asie orientale.

Ainsi, selon le Conseil International des Céréales (CIC,) le groupe constitué de la Chine, du Japon et de la Corée du Sud concentre 30% des importations mondiales en volume (sur la période 2000-2005). Il est principalement approvisionné par les Etats-Unis, le Canada et l'Australie (Figure 01).

L'Afrique draine quant à elle un cinquième (1/5) des échanges mondiaux, dont plus de la moitié (64%) est destinée aux pays du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie et Egypte). Les fournisseurs de ce continent sont essentiellement l'Union Européenne et les Etats-Unis. L'Amérique du sud, surtout le Brésil, et le Proche Orient représentent chacun un dixième (1/10) du marché. Leurs fournisseurs respectifs sont l'Argentine d'une part, les Etats-Unis et l'Australie d'autre part (Figure 01) (Kellou, 2008).

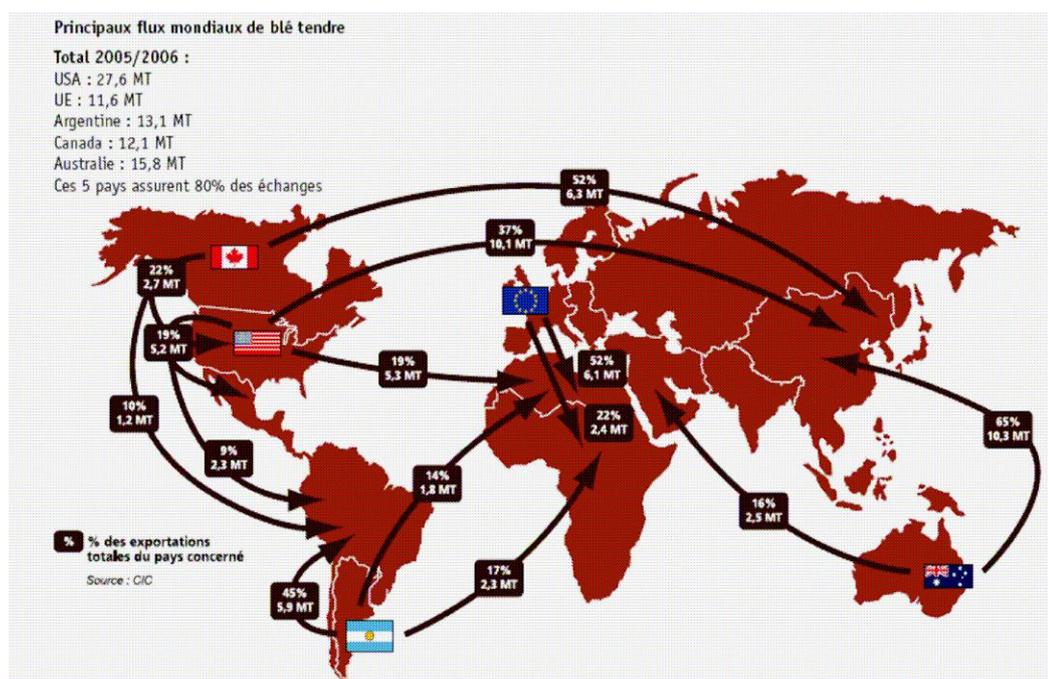


Figure 01: Principaux flux mondiaux de blé Source : Conseil International des Céréales, 2006 in (Kellou, 2008).

1-2-2- EN ALGERIE

Selon les données de FAOSTAT (2017), la production céréalière de 2017 a été estimée par le gouvernement à environ 3,5 millions de tonnes, soit 5 pour cent de plus que la récolte de 2016 et 17 pour cent de moins que la moyenne quinquennale précédente (2012-2016). Quelque 2,35 millions d'hectares ont été plantés avec des céréales d'hiver qui ont été récoltées en 2017, contre 2,2 millions d'hectares plantés la saison précédente (Tableau 03).

Tableau 03: Production des céréales en Algérie (FAOSTAT, 2017)

	Moyenne 2012-2016	2016	2017	Variation 2017 /2016
		(000 tonnes)		(%)
Blé	2 833	2 200	2 400	+ 9
Orge	1 246	1 000	968	-3
Avoine	104	118	104	-10
Autres	3	2	2	0
Total	4 186	3 320	3 474	+ 5

La production est marquée par une forte irrégularité, elle-même conditionnée par les aléas climatiques (Figure 02). Le blé dur est semé sur 1,2 millions d'hectares avec une production moyenne qui oscille entre 1.5 à 2.0 millions de tonnes (Tableau 04). La production nationale couvre 40% des besoins du pays, et représente 45% de la production totale des céréales alors que la production de l'orge représente plus de 28% suivi par 24% pour le blé tendre (Benbelkacem, 2013). Bien que la sole, emblavée en blé dur, soit relativement importante, au regard des superficies réservées à la céréaliculture et malgré d'indéniables progrès, les rendements demeurent faibles et très irréguliers comparativement à ceux réalisés par les pays méditerranéens de l'Europe. Afin de combler le déficit en produits céréaliers, l'Algérie recourt à des fournisseurs (Rastoin et Benabderrazik, 2014).

Tableau 04 : Evolution de la superficie récoltée, du rendement et de la production de la culture du blé en Algérie de 2010 à 2016 (FAOSTAT, 2017)

Année	Superficie récoltée (ha)	Rendement (q^x /ha)	Production (tonnes)
2010	1 755 728	14,838	2 605 178
2011	1 672 431	17,405	2 910 890
2012	1 945 776	17,639	3 432 231
2013	1 727 242	19,100	3 299 049
2014	1 651 311	14,753	2 436 197
2015	1 814 722	14,640	2 656 731
2016	1 442 846	16,912	2 440 097
Moyenne	1 698 915,25	16,47	2 728 425,75

Au cours des cinq dernières années, l'Algérie a importé en moyenne environ 6 millions de tonnes de blé par an, soit 70% de son utilisation intérieure. Les besoins d'importations de blé pour 2017/18 (juillet / juin) devraient être de 8,2 millions de tonnes (figure 03), ce qui est légèrement inférieur aux importations de l'année dernière (Faostat, 2017).

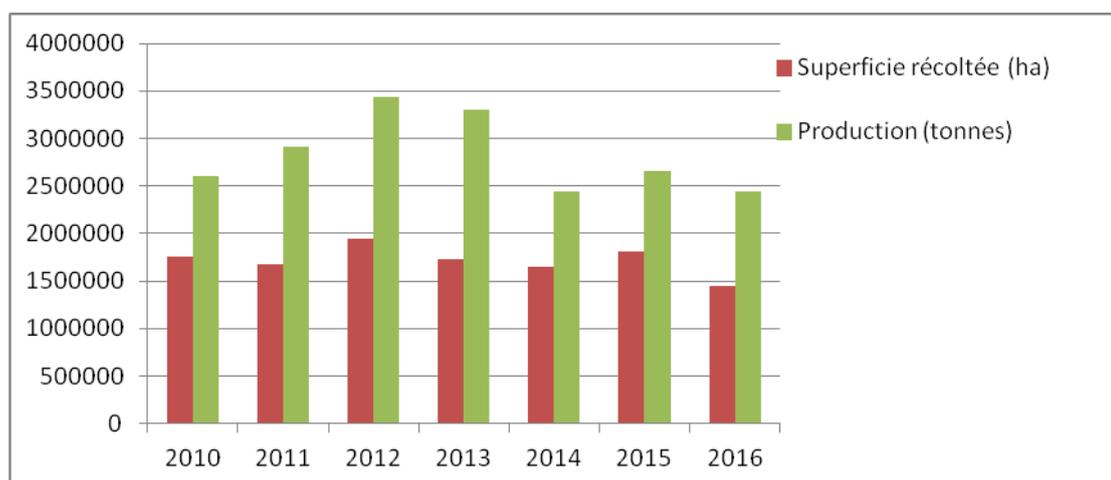


Figure 02 : Evolution de la superficie récoltée (ha) et de la production du blé en Algérie (FAOSTAT 2017).

Selon les données du Centre National de l'Information et des statistiques des Douanes, les quantités importées des céréales (blé, orge et maïs) par l'Algérie ont enregistré une baisse de 3,3% pour l'année 2016 (soit 13,22 million de tonnes) par rapport à l'année 2015 (soit 13,67 million de tonnes). Quant à la valeur des importations, cette dernière a baissé à 2,7 milliards de dollars en 2016 contre 3,43 milliards de dollars en 2015 (soit -20,9 %). Il est à souligné que la production nationale en 2015-16 est de 34 millions de quintaux (Tableau 5). L'Algérie est déficitaire plus spécialement en blé tendre, ce dernier représente 49% des importations en quantité et 46% en valeur. En effet, le total des importations du blé tendre a atteint 6,4 millions de tonnes en 2016 (soit 1240 millions USD) (Tableau 05).

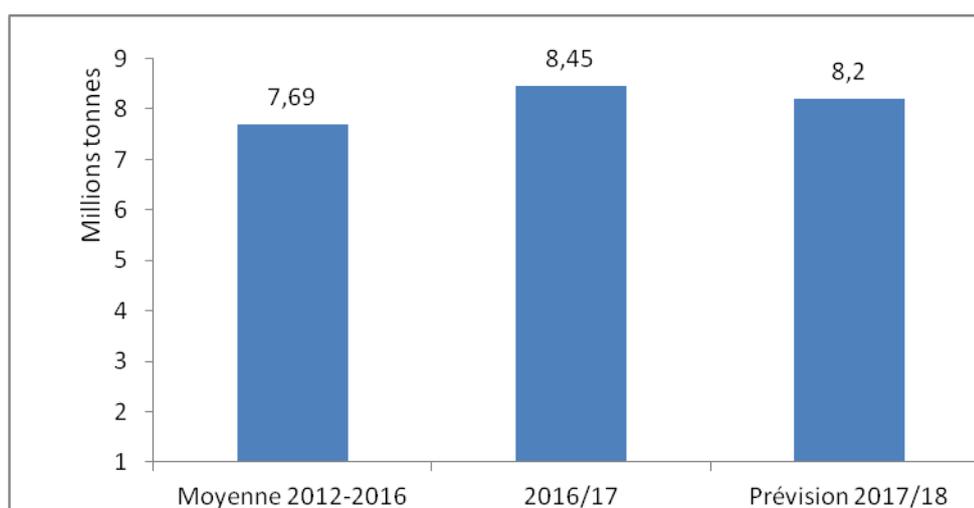


Figure 03 : Importations Algériennes du blé (FAOSTAT 2017)

Tableau 5 : Importations Algériennes des céréales (blé dur, blé tendre, orge et maïs) en quantité (tonne) et en valeur (millions USD) de l'année 2015 et 2016 (ONFAA, 2016)

Année	Blé dur		Blé tendre		Orge		Maïs		Total céréales	
	Quantité (T)	Valeur millions (USD)								
2015	1763454	782,9	6741393	1612	750025	164,5	4167109	871,6	13672346	3431
2016	1795596	549,2	6430008	1240	879213	153,3	1445338	768	13220157	2711
Variation	+ 1,8%	-29,8%	- 4,6 %	- 23 %	+ 17,2	- 6,8 %	- 6,8 %	- 11,8%	- 3,3 %	- 20,9%

1-2-2-1- PLACE DU BLE DANS LA CONSOMMATION ALIMENTAIRE DES MENAGES

Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien. Effectivement, les céréales constituent la base du modèle de consommation alimentaire dans ce pays, comme dans la plupart des pays méditerranéens. 54% des apports énergétiques et 62% des apports protéiques journaliers provenaient de ces produits en 2003 et le blé représentait 88% des céréales consommées (Padilla et Oberti, 2000). L'Algérie se situe ainsi au premier rang mondial pour la consommation de blé avec plus de 200 kg en 2003, l'Égypte se situant à 131 kg et la France à 98 (Tableau 6).

Tableau 06: Consommation par tête de blé (Kg) dans quelques pays, 1961-2003. (FAOSTAT, 2005 in Kellou, 2008).

	1961	1970	1980	1990	2000	2003	Var. 1961-2003
Algérie	110	120	182	193	190	201	82%
Tunisie	146	153	195	205	202	194	33%
Maroc	130	129	153	180	172	179	38%
Italie	162	176	173	149	150	152	-6%
Égypte	79	87	125	148	136	131	65%
France	126	97	96	92	97	98	-22%
Monde	55	57	65	70	68	67	22%

1-2-2-2- EVOLUTION DE LA CULTURE CERELIERE AU NIVEAU NATIONAL

Si on s'intéresse d'une manière plus précise au blé, on constate qu'il occupe une place très importante dans la structure spatiale de l'activité agricole. Il occupe environ 60% des superficies céréalières emblavées qui représentent environ 45% de la SAU. Actuellement, la superficie moyenne du blé se situe à environ 1 698 915Ha (Tableau 4).

Le blé est produit en Algérie dans trois régions qui sont la zone littorale dont la pluviométrie est supérieure à 600 mm, les plaines intérieures, avec une pluviométrie de 450 à 600 mm et les hauts plateaux, avec 350 à 450 mm. La majorité de la sole réservée à la culture du blé dur est localisée à l'intérieur du pays, sur les hauts plateaux où la culture est confrontée à plusieurs contraintes naturelles (sol et climat), techniques (semences, pratiques culturales) et humaine (organisation et formation des producteurs) (Benbelkacem, 2013).

Ces espaces cultivés sont marqués par une forte diversification agro-pédo-climatique, car les variations de la pluviométrie contribuent jusqu'à 50% à la différence des rendements d'une année à l'autre, et où la céréaliculture est difficilement substituable. On remarque que pour certaines années, les superficies récoltées ne représentent que 1/3 des superficies emblavées. On peut expliquer cette situation par les années de sécheresse qui touchent le pays, donc nous pouvons confirmer que la culture du blé en Algérie est fortement tributaire des eaux de pluie (Chehat, 2005).

Bien que le calcul des rendements ne prenne en compte que les superficies récoltées, on le trouve faible et surtout très aléatoire. Comparativement à la moyenne mondiale, qui est de 30,09 Qx/Ha pour 2017, le rendement du blé algérien n'est que pour les meilleures années 50% de la moyenne mondiale. Ils sont en moyenne de 16,3 Qx/Ha, (Tableau 4, Figure 4) (ils sont parmi les plus faibles dans le monde) (FAOSTAT, 2017).

L'ensemble des enquêtes menées sur la baisse des rendements, a montré que la tendance générale des exploitations céréalières est à la minimisation du risque par la simplification des itinéraires techniques appliqués à la culture des blés. De ce point de vue, il faut relever que les opérations culturales considérées comme moins indispensables (réduction des façons culturales, suppression du roulage après semis, de la fertilisation chimique et du désherbage) sont supprimées dans la majorité des exploitations céréalières. La simplification volontaire des itinéraires techniques se répercute inévitablement et de manière négative sur le rendement même lorsque les conditions climatiques ont été favorables (Chehat, 2005).

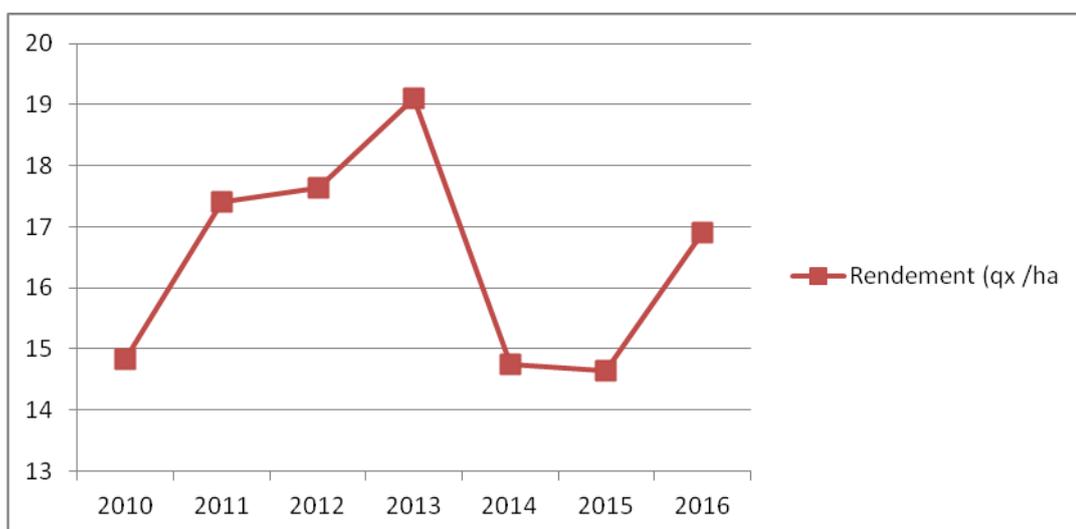


Figure 04 : Evolution du rendement du blé (qx /ha) en Algérie (FAOSTAT, 2017)

L'Etat a accordé, en 1999, 195 millions de dollars en soutien à la filière céréalière. Ce montant est passé à 537 millions de dollars en l'an 2000, ce qui représente un taux d'accroissement de 175%, mais la démarche n'a pas eu un impact significatif sur la sphère de la production céréalière. Exception faite d'une amélioration substantielle des volumes de blés collectés, les superficies dédiées à la culture des blés ont baissé significativement, alors que les rendements et la production en blé ont évolué de manière erratique. Les raisons de cette stagnation sont nombreuses : une pluviosité capricieuse, la chute de grêle, les inondations et l'apparition de certaines maladies, notamment la rouille que les agriculteurs ne savent pas traiter. La conséquence en a été un accroissement des importations et une baisse des blés locaux collectés dans l'approvisionnement du marché interne. La production nationale des deux variétés de blé (tendre et dur) ne couvre que 30% des besoins du marché national estimés à plus de 60 millions de quintaux (Kellou, 2008).

1-3- LA SPECIFICITE DU CLIMAT DES HAUTS PLATEAUX

Trois ensembles fortement contrastés climatiquement caractérisent le territoire algérien:

- Le Sahara, ensemble désertique aride (pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm/an).
- Le littoral et les massifs montagneux : le climat est de type méditerranéen, avec des pluies très violentes en hiver provoquant une forte érosion. En été, les précipitations sont extrêmement rares et les chaleurs très fortes. Les pluies pouvant atteindre 1600 mm/an sur les reliefs sont irrégulières d'une année sur l'autre et inégalement réparties.
- Les hauts plateaux occupent environ 9% de la superficie totale, dont 5 millions d'ha de terres agricoles, sont caractérisés par un climat semi aride (pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an) (FAO, 2005).

Les hauts plateaux qui concernent plus de 80% de la céréaliculture algérienne, sont sous la triple influence de l'Atlas tellien qui limite les précipitations hivernales, de l'Atlas saharien et du Sahara, et de l'altitude qui entraîne des gelées tardives (Baldy, 1993).

Baldy (1974) a résumé les principales contraintes climatiques affectant le rendement des céréales en Algérie :

- Caractères aléatoires des pluies d'automne, avec deux conséquences :
 - *risques de sécheresse affectant la germination et la levée ;
 - *risques d'orages violents rendant difficiles les semis et risquant de les retarder.
- Basses températures hivernales en situation d'altitude (minima sous abris de l'ordre -10 °C, qui peuvent se traduire par des températures de -15 °C au niveau du feuillage).
- Irrégularité des pluies de printemps : des déficits hydriques au cours de la phase fin tallage-début montaison réduisent le nombre d'épillets formés, puis le développement des organes sexuels, le développement des tiges, et enfin des feuilles du dernier entre-nœud : des déficits hydriques plus tardifs (post floraison) sont très néfastes à la formation des grains.
- Gelées de printemps (pouvant atteindre - 2 °C à -3 °C sous abri, soit - 6 °C à -8 °C au niveau des feuilles), qui détruisent les apex en cours de différenciation ; les risques de gelées peuvent se présenter, dans certaines zones, jusqu'à la floraison.
- Déficit hydrique et coups de chaleur après la floraison : ils limitent le remplissage du grain et provoquent de l'échaudage.

2- LES CONTRAINTES ABIOTIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE BLE

L'amélioration génétique du blé dur des zones sèches reste basée sur la recherche d'une meilleure tolérance aux stress abiotiques, pour adopter la plante à la variabilité du milieu de production (Amokrane, 2001). Sous les conditions agroclimatiques de culture, le matériel végétal subit tout au long de son cycle, de nombreuses contraintes qui influent de manière variable sur le potentiel de production. La variation des rendements des céréales des zones semi arides tire son origine en grande partie des effets de ces contraintes abiotiques (Bouzerzouz et Benmahammed, 1994).

2-1- L'ECLAIREMENT

La lumière est la source d'énergie qui permet à la plante de décomposer le CO₂ atmosphérique pour en assimiler le carbone et réaliser la photosynthèse des glucides. Elle est donc un facteur climatique essentiel et nécessaire pour la photosynthèse (Diehl, 1975). Néanmoins, elle peut devenir une source de stress par son intensité, éclaircissement trop faible ou trop élevé, conduisant à des phénomènes de photosensibilisation dangereux pour la plante (Leclerc, 1988). Sous les conditions de cultures des hautes plaines, c'est plutôt l'excès de l'éclaircissement qui est un stress, conduisant à la photo inhibition des centres réducteurs des photosystèmes (Ykhlef, 2001).

2-2- LA TEMPERATURE

Comme toute plante, le blé dur a un optimum écologique du point de vue température. Au delà de cet optimum, la plante souffre et elle est pénalisée d'autant plus que les valeurs prises par ce facteur écologique s'en écartent trop (Papadakis, 1932). La température rythme la croissance et le développement de la plante. Son action est permanente tout le long du cycle. Elle conditionne l'absorption des éléments nutritifs, l'activité photosynthétique, l'accumulation de la matière sèche et le passage d'un stade végétatif à un autre (Van Oosterom *et al.*, 1993, Mekhlouf *et al.*, 2006).

2-2-1- LES BASSES TEMPERATURES

Le degré de sensibilité de la céréale au froid est très variable dans le temps et fonction des stades végétatifs. Les basses températures hivernales entravent la croissance, en début du cycle, des génotypes sensibles et sont nécessaires pour la satisfaction des besoins des variétés vernalles (Bouzerzour *et al.*, 1995). Lorsqu'elles se présentent tardivement au printemps, leur

avènement coïncide avec le stade méiose, elles détruisent alors les grains de pollen et les ovaires (Abbassenne, *et al.*, 1997).

Les blés cultivés traditionnellement dans le bassin méditerranéen sont de type semi-alternatif. Leur floraison est assez tardive leur permettant d'échapper aux basses températures printanières. L'adoption de cultivars de type printemps, insensible à la photopériode et aux besoins négligeables en températures vernalles sur les hautes plaines orientales ont montré le risque des épiaisons précoces induites, chez de tels génotypes, par des températures hivernales plus douces (Bouzerzour *et al.*, 2002, Mekhlouf *et al.*, 2006).

Paulsen et Heysen (1983) observent des dégâts très importants sur le blé tendre, au stade épiaison, dues à des températures de l'ordre de 0,3°C sous abri. La température de l'ordre de + 6°C est rapportée comme étant destructive au stade formation du grain de pollen (Gate, 1995).

Pendant la phase de montaison, les effets des basses températures, dans la plage des – 5°C à +3°C se manifestent par des limitations de la croissance et la destruction des jeunes feuilles et des talles, dans les cas sévères. Sutka (1994) montre, à partir de l'analyse d'un croisement diallèle de blé tendre, que le contrôle génétique de la tolérance au froid est de nature additive.

Les résultats de l'analyse de substitution chromosomique montrent qu'aux moins 10 chromosomes interviennent dans le contrôle de la tolérance au froid et que les chromosomes 5D et 5A sont les plus actifs (Sutka 1994). Mekhlouf *et al.*, (2001) notent une grande variabilité de réponses des génotypes de blé dur vis à vis de cette contrainte.

2-2-2- LES TEMPERATURES ELEVEES

Les hautes températures interviennent aussi comme contrainte limitant le potentiel de production des zones semi-arides. Elles affectent les organes floraux, la formation du fruit, ainsi que le fonctionnement de l'appareil photosynthétique. Au cours de la montaison, elles entraînent la réduction du tallage-épi (El Madidi et Zivy, 1993).

La méiose et la phase de remplissage du grain sont particulièrement sensibles à cette contrainte. Les seuils de 25 à 27 °C sont rapportés comme étant très pénalisants. Le nombre de grains/épi et le poids du grain sont fortement affectés (Cackett et Wall, 1971; Gate *et al.*, 1996, Fellah *et al.*, 2002).

L'avènement de cette contrainte, si elle est accompagnée par un déplacement des masses d'air chaud venant du sud, exagèrent les effets sur la plante en augmentant la transpiration, la respiration, engendrant la sénescence foliaire, qui est suivie par la sénescence de la plante entière si ce phénomène, connu localement sous le vocable de sirocco, perdure au delà de trois jours (Baldy, 1974).

Globalement les températures élevées réduisent la taille et le poids des organes. Leur incidence demeure plus faible sur le nombre d'organes émis. Les variétés tardives sont généralement celles qui sont les plus exposées à ce type de contrainte. Sous ces conditions limitantes, elles accusent des baisses de rendements liés à la coïncidence de la phase de remplissage avec la période d'élévation de la température (Bouzerzour *et al.*, 1995).

Les géotypes précoces esquivent et minimisent le plus souvent les effets de cette contrainte (Abbassenne *et al.*, 1997). Monneveux *et al.*, (2002) notent que les températures supérieures à 30°C, après floraison, ont des effets négatifs sur le stockage des assimilats et la qualité de la graine.

2-3- LE STRESS HYDRIQUE

L'eau constitue le milieu interne des plantes. C'est une véritable matrice vitale du fonctionnement cellulaire. A l'exception des grains mûrs, les différents organes de la plante renferment entre 80 et 90 % d'eau d'imbibition. Cette eau est nécessaire au fonctionnement de la plante. L'eau d'imbibition qui s'évapore suite à la transpiration est renouvelée en permanence par l'eau absorbée par les racines. Lorsque l'absorption ne peut satisfaire la demande de la transpiration, alors le stress hydrique s'installe (Levitt, 1980).

En agriculture, le stress hydrique est défini comme un déficit marqué et ce compte tenu des précipitations qui réduisent significativement les productions agricoles par rapport à la normale pour une région de grande étendue (Mckay, 1985 in Bootsma *et al.*, 1996). En effet, on assiste à un stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période ou lorsque sa mauvaise qualité en limite l'usage (Madhava Rao *et al.*, 2006). Le stress hydrique est toute restriction hydrique qui se traduit par une baisse de potentiel de la plante suite à une perturbation de son activité physiologique provoquée par un déficit de consommation en eau (Mouhouche et Boulassel, 1997).

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides (Chennafi *et al.*, 2006). Le régime des pluies méditerranéennes est très irrégulier dans l'espace et le temps. L'efficacité de ces pluies pour la céréale dépend fortement des techniques culturales appliquées, des caractéristiques hydrodynamiques des sols et du rythme de développement de la variété cultivée (Kribaa, 2002). La fréquence des événements pluvieux tend à décroître à partir du mois d'avril, alors que la température devient de plus en plus forte. La demande climatique s'accroît à un moment où se détermine le rendement en grain (Mekhlouf *et al.*, 2006). La phase critique pour l'eau débute avec le stade gonflement et se termine 20 jours après l'épiaison, date de réalisation du palier hydrique (Oweiss et Zhang, 1998).

Selon le stade végétatif où il survient, le stress hydrique affecte différemment la plante. Au stade tallage, il réduit le nombre de talles herbacées (Black, 1970). A la montaison, il provoque un arrêt de croissance des tiges. Il s'ensuit une diminution du nombre de talles fertiles dont la conséquence est une réduction du nombre de grains /m² (notamment par augmentation du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité mâle) (Debaeke *et al.*, 1996b). Si la sécheresse survient durant les deux dernières semaines précédant l'épiaison, elle peut réduire le nombre de grains par épillet (Fisher, 1973). Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse de remplissage des grains et/ou de la durée de remplissage (Triboï, 1990). Au cours du remplissage des grains, le manque d'eau a pour conséquence une réduction de la taille des grains (échaudage), réduisant par conséquent le rendement (Gate, 1995).

3- MECANISME D'ADAPTATION AUX STRESS

L'adaptation est synonyme de survie, mais elle est définie aussi comme la capacité d'une plante à croître et à donner des rendements satisfaisants dans les zones sujettes à des stress de périodicités connues (Papadakis, 1932).

La notion d'adaptation se confond parfois avec celle de résistance et de tolérance au stress. En fait l'adaptation n'est que la résultante de la tolérance aux contraintes. Une plante adaptée est donc celle qui tolère ou résiste à un stress donné et réussit à produire à un niveau satisfaisant par rapport à une autre plante qui sera dite non adaptée (Ceccarelli *et al.*, 1992, Fellah *et al.*, 2002).

Il existe chez les plantes des différences du point de vue adaptation au milieu (Tableau 07). Levitt (1980) mentionne que la résistance peut prendre trois formes distinctes:

- L'esquive ou échappement à la contrainte est un mécanisme d'adaptation des plantes vis à vis des contraintes abiotiques. Les variétés qui se distinguent par cette caractéristique, se développent en dehors de la période de contrainte intense, grâce à la modulation du cycle de développement pour l'adapter à la situation prévalente (Dakheel *et al.*, 1993, Simane *et al.*, 1993, Mekhouf *et al.*, 2006).
- L'évitement de la déshydratation des tissus est la situation où la plante fait appel à différents mécanismes pour se maintenir à un niveau de la contrainte nettement inférieur à celui exercé par l'environnement. C'est ainsi que certains génotypes de blé dur évitent la contrainte hydrique en favorisant le développement de leur système racinaire en profondeur pour chercher de l'eau qui leur permet de réduire des effets du déficit hydrique qu'ils endurent (Ali Dib *et al.*, 1992).
- La résistance au stress ou à la déshydratation des tissus qui se manifeste sous la forme d'un ensemble de mécanismes qui induisent chez la plante une capacité à accepter la contrainte mais sans subir les effets. C'est la résistance génétique. Elle permet à la plante de résister à la déformation mécanique, à la dégradation membranaire et de maintenir ses activités métaboliques sous des niveaux de contrainte assez élevés

Tableau 07: Principaux caractères impliqués dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse (Turner *et al.*, 2001).

Mécanisme	Utilité	Facilité de sélection
1- Esquive		
Phénologie	Très haute	Facile
Plasticité de développement	Haute	Facile
2- Evitement de la déshydratation		
Contrôle stomatique	Haute	Difficile
ABA	Discutable	Difficile
Ajustement osmotique	Fonction des espèces	Difficile
Développement racinaire	Haute	Très difficile
3- Tolérance à la déshydratation		
Stabilité membranaire	Haute	Facile
Potentiel hydrique létal	Haute	Difficile
Proline	Discutable	Facile

3-1- ADAPTATIONS PHENOLOGIQUES

L'amélioration de la production des zones arides et semi-arides passe nécessairement par l'introduction de la tolérance aux stress aux nouvelles variétés pour mieux les adapter à la variabilité, souvent de nature imprévisible, du milieu de production. Quoiqu'il reste très difficile de faire un progrès quelconque, lorsque les stress qui entravent le développement de la plante sont nombreux et imprévisibles, pouvant se manifester à n'importe quel stade de la plante (Feyerherm *et al.*, 1984).

Sous climat de type méditerranéen, les stress localisés en fin de cycle sont les plus fréquents pour ne pas dire omniprésents. Dans ce cadre la phénologie de la plante est le moyen le plus simple et le plus utilisé pour échapper à ce type de stress.

La phénologie est un phénomène relatif à la périodicité des événements morpho-physiologiques de la plante (développement et croissance) et leur interaction avec la variabilité climatique du milieu de production (Kirby *et al.*, 1985).

La stratégie appliquée en amélioration variétale, pour réduire les effets des stress, consiste à raccourcir la durée du cycle de la variété. La phénologie rythme le développement de la plante et ajuste le cycle végétatif de manière à l'assortir aux conditions optimales de croissance de l'environnement de production (Bouzerzour *et al.* 1998).

La précocité à l'épiaison et à maturité est un mécanisme important d'esquive de la sécheresse tardive. Chaque jour de gagnée en précocité génère un gain de rendement variant entre 30 et 85 kg/ha (Fischer et Maurer, 1978).

En milieu où le gel tardif est une contrainte à la production des céréales, une précocité excessive n'est d'aucune utilité, au contraire, elle risque d'être une source d'instabilité des rendements en grains. Une précocité modérée peut cependant constituer un avantage lors de la reprise de la croissance après un bref stress (Bouzerzour *et al.*, 1998).

3-2- ADAPTATIONS MORPHOLOGIQUES

L'effet de la sécheresse peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou variété, par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et/ou pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilats. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine : réduction de la surface foliaire et du nombre de talles, enroulement des feuilles et/ou meilleur développement du système racinaire (Slama *et al.*, 2005).

L'efficacité de l'extraction de l'eau du sol par les racines figure parmi les types d'adaptation permettant à la plante d'éviter ou, plus exactement, de retarder la déshydratation de ses tissus (Turner *et al.*, 2001). L'aptitude des racines à exploiter les réserves en eau du sol sous stress est une réponse particulièrement efficace pour l'élaboration de la production de graines (Passioura, 1977).

Le développement du système racinaire, joue un rôle essentiel dans l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Bensalem et Vierra Da Siva (1990) affirment qu'un système racinaire extensif permet au blé de mieux résister à une contrainte hydrique. Baldy (1974), Benlaribi *et al.*(1990) et Ali Dib *et al.*(1992), soulignent la relation positive entre la rapport de la matière sèche aérienne /matière sèche racinaire et la sensibilité à la sécheresse. Hurd (1974), Sullivan et Ross (1979) et Al Hakimi (1995) notent l'existence d'une corrélation positive, en conditions sèches, entre le rendement le développement racinaire chez les céréales à paille.

La hauteur de la plante apparaît comme un critère de sélection important particulièrement pour les zones arides. Mekliche (1983) trouve une liaison positive et significative entre le rendement grain et la hauteur de la paille. Ceci s'expliquerait par le fait qu'une paille haute s'accompagne souvent d'un système racinaire profond ce qui conférerait à la plante une capacité d'extraction de l'eau supérieur (Bagga *et al.* 1970).

Fisher et Maurer (1978) mentionnent que les blés hauts ont un indice de sensibilité à la contrainte hydrique plus faible comparativement aux blés nains et semi nains. Alors que Bouzerzour *et al.* (1998) montre que les variétés de blé dur à paille courte, sous stress sévères en fin de cycle, ont une bonne adaptation et une meilleure productivité que les blés hauts et tardifs.

La réduction de la surface foliaire, quand le stress hydrique est très important, est un mécanisme de réduction des besoins en eau. O'toole et Cruz (1980), montrent que l'enroulement des feuilles entraîne une diminution de 40% à 60% de la transpiration. Le phénomène d'enroulement du feuillage chez le blé joue un rôle important dans la réduction de la transpiration, sans diminution de l'activité photosynthétique. La morphologie et la surface des feuilles sont des caractéristiques liées à la réduction des pertes d'eau par la plante. Cette régulation est rythmée par l'ouverture et le nombre de stomates par unité de surface foliaire (Hurd 1974).

D'après Acevedo et Ceccarelli (1987), le port des feuilles serait lié à la tolérance à la sécheresse. Chez l'orge, les feuilles verticales étroites seraient plus favorables à une adaptation au stress hydrique que les feuilles larges et flasques.

La longueur du col de l'épi a souvent été proposée comme critère de sélection de génotypes tolérants au déficit hydrique (Fisher et Maurer, 1978). Ce caractère a toutefois un déterminisme génétique plus complexe que celui de la hauteur de la plante (Al- Hakimi, 1995). Le rôle de ce caractère s'expliquerait par les quantités d'assimilats stockés dans cette partie de la plante qui sont susceptibles d'être transportés vers le grain en conditions de déficit hydrique terminal (Gate *et al.*, 1996).

La glaucescence, la pilosité des feuilles ou des tiges, la couleur claire des feuilles et la présence de cire induisent une augmentation de la réflectance qui conduit à une réduction des pertes en eau. Clarke *et al.*, (1989) montrent que la glaucescence réduit le taux de déperdition d'eau (transpiration cuticulaire) en conditions sèches et que les variétés qui ont une glaucescence élevée donnent dans ces conditions, des rendements plus élevés que les variétés à faible glaucescence.

La présence des barbes chez les céréales augmente la possibilité d'utilisation de l'eau et l'élaboration de la matière sèche lors de la maturation de grain (Nemmar, 1980). La photosynthèse, chez les génotypes barbus comparativement aux génotypes glabres, est moins sensible à l'action inhibitrice des hautes températures lors du remplissage des grains (Fokar *et al.*, 1998).

En comparant trois variétés de blé dur, Slama, (2002) trouve que la variété ayant la barbe la plus développée, sous contrainte hydrique, présente le meilleur rendement. En effet, les barbes peuvent améliorer le rendement en conditions de sécheresse par augmentation de la surface photosynthétique de l'épi (Slama *et al.*, 2005).

3-3- ADAPTATIONS PHYSIOLOGIQUES

Le maintien d'un potentiel hydrique élevé dans la plante peut être obtenu par une réduction de la transpiration s'effectuant par la cuticule et les stomates incomplètement fermés (Belhassen *et al.*, 1995). Le contrôle stomatique équilibre le bilan hydrique de la plante, restaure la turgescence et la croissance, et protège les organelles des feuilles sensibles vis-à-vis du déficit hydrique (De Raissac, 1992). Chez le blé, la transpiration résiduelle ou cuticulaire représente plus de 50% de la transpiration totale, chez les plantes soumises à une contrainte hydrique (Clarke et Romagosa, 1991).

En situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates pour réduire ses pertes en eau (Tardieu et Dreyer, 1997). La régulation, de l'ouverture et la fermeture des stomates dépend du potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ (Turner, 1997). Une faible conductance stomatique induit une fermeture des stomates rapide en conditions de déficit hydrique. Les géotypes à faible conductance sont plus sensibles au déficit de vapeur et à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les géotypes à forte conductance. Une faible conductance est généralement proposée comme critère favorable à l'adaptation à la sécheresse (Turner, 1986).

La détermination de la fonction de l'ouverture stomatique reste encore en débat (Cochard *et al.*, 1996). Néanmoins, l'effet de plusieurs facteurs agissant sur l'ouverture stomatique a été montré : l'augmentation de l'irradiation a pour conséquence d'ouvrir les stomates tandis que l'augmentation de la concentration en CO₂ ou du déficit de vapeur dans l'air induisent un processus inverse (Hinckley et Braatne, 1994). De nombreuses études ont mis en évidence des facteurs internes à la plante agissant sur les processus de régulation stomatique. L'effet de l'acide absicique (ABA) en tant qu'inducteur de la fermeture stomatique a été largement documenté (Wartinger *et al.*, 1990; Davies et Zhang, 1991), mais il y a encore des incertitudes sur son origine et sur sa contribution exacte à ce phénomène (Dreyer, 1997).

La teneur relative en eau de la feuille est un paramètre physiologique indicateur de la résistance des espèces vis-à-vis d'un stress hydrique (Berka et Aïd, 2009). Le maintien d'un potentiel hydrique élevé est lié à l'aptitude à extraire l'eau du sol et à la capacité à limiter les pertes d'eau par transpiration (Turner, 1986). Les géotypes qui maintiennent leur TRE élevée lors du stress hydrique seront probablement les plus tolérants et seront les plus productifs (Sassi *et al.*, 2012). Benmahammed *et al.*, (2008) notent que la corrélation positive entre la teneur relative en eau et la biomasse accumulée indique, qu'en général, l'accumulation de la biomasse sous stress est dépendante du contenu foliaire en eau. Clarke *et al.*, (1989) suggèrent que la teneur relative en eau comme critère de criblage pour la sélection de lignées tolérantes à la contrainte hydrique.

D'autres mécanismes encore peuvent intervenir dans le maintien de la turgescence cellulaire, comme l'élasticité membranaire, la réduction de la taille des cellules (Tyree et Jarvis, 1982) et la résistance protoplasmique. Cette dernière dépend de la capacité des cellules à résister à un dommage mécanique et à la dénaturation des protéines au niveau membranaire ou cytoplasmique (Gaff, 1980). Le mécanisme de tolérance des membranes cellulaires

s'exprime lorsque ces dispositifs périphériques de protection des cellules ne sont plus efficaces.

Chez le blé dur, la résistance à la sécheresse au sein de la plante entière dépend, du moins en partie, de l'existence de mécanismes opérant au niveau cellulaire (Bajji *et al.*, 2000). La tolérance des membranes cellulaires face à la contrainte hydrique est l'un des mécanismes de résistance à la sécheresse les plus efficaces chez les plantes. Il a été mis en relation avec la performance au champ des géotypes sur différentes espèces végétales notamment sur des légumineuses (Vasquez-Tello *et al.*, 1990 ; Dhanda *et Sethi*, 2002). Ces différents résultats montrent bien qu'une appréciation de l'intégrité des membranes en condition de stress constitue une approche indispensable pour l'évaluation de la capacité de tolérance à la sécheresse d'un matériel donné (Annerose, 1990).

La température de surface du couvert végétal est une caractéristique physique de la plante influencée par la contrainte hydrique. La capacité des plantes à maintenir une température foliaire basse est une indication de leur grande capacité à extraire l'eau du sol et à se rafraîchir par transpiration. Ces variétés maintiennent une activité photosynthétique élevée autorisant un rendement plus élevé, sous stress terminal. La mesure de la température de la canopée a bénéficié d'un certain intérêt comme technique de criblage pour la résistance au stress, particulièrement avec l'avènement du thermomètre infrarouge portable. Dakheel *et al.*, (1993) trouvent que durant les premiers stades de développement, jusqu'au stade épiaison, quand la température de l'air est relativement basse, la température de la canopée est corrélée positivement avec le rendement en grains. A partir du stade épiaison et durant la période de remplissage du grain, la température foliaire est corrélée négativement avec le rendement en grains. Des températures basses du couvert végétal sont indicatives d'un potentiel hydrique foliaire élevé (Blum *et Pnuel*, 1990).

Reynolds *et al.*, (1994) montrent l'existence d'une différence de 5°C entre la température de l'air et celle de la canopée de certains géotypes de blé conduits sous stress thermique. Il observe des écarts de température allant jusqu'à 10°C au dessous de la température de l'air pour certaines lignées. Ils suggèrent que la température de couvert végétal comme un excellent outil de sélection pour la résistance au stress thermique.

La durée de la surface verte ou la stabilité de la chlorophylle est une autre caractéristique qui est utilisée en sélection pour la tolérance et l'adaptation au stress thermique (Acevedo *et al.*, 1991). La concentration en chlorophylle de la feuille étandard, mesurée deux semaines après l'anthèse montre une corrélation significative avec le rendement grain sous

stress thermique (Reynolds *et al.*, 1994). Bousba *et al.*, (2009), indiquent qu'une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur sous stress hydrique. Tahri *et al.*, (1997) montrent que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress suivie par un abaissement dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b). Ainsi la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa.

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, 1988).

Selon Monneveux et This (1997), la tolérance est un abaissement du potentiel hydrique qui s'exprime par un maintien de la turgescence, rendu possible grâce au phénomène d'ajustement osmotique. Ce dernier est réalisé grâce à une accumulation des solutés (principalement vacuolaire) conduisant à un maintien du potentiel de turgescence (Blum, 1989 ; Morgan *et al.*, 1986 ; Turner, 1986). L'ajustement osmotique permet à différentes échelles de tolérer la déshydratation. En effet, l'accumulation des solutés dans la vacuole et dans le cytosol contribue au maintien de la turgescence d'une part et à la protection des organes jeunes, des membranes et des systèmes enzymatiques d'autre part. Les solutés responsables de l'osmorégulation sont essentiellement des acides organiques, des acides aminés et des sucres. Certains constituants inorganiques peuvent être présents. Parmi les acides aminés, l'accumulation de la proline pourrait conduire à une osmorégulation plus efficace. Elle a été depuis longtemps observée chez les plantes soumises à un stress abiotique.

L'accumulation de la proline est indépendante des stades de développement, elle est liée à l'alimentation hydrique (Monneveux et Nemmar, 1986) et l'intensité du stress hydrique (Al Hakimi et Monneveux, 1993). Blum et Ebercon (1976) notent qu'il existe une relation entre la capacité d'accumulation de la proline et l'aptitude de récupération de la plante à l'issue du déficit hydrique et suggèrent que l'acide aminé sert de source d'énergie lors du retour aux conditions normales. La proline ne semblerait pas jouer un rôle direct dans l'ajustement osmotique, elle serait plutôt un symptôme de souffrance (Korichi, 1992).

Kameli et Losel (1995) considèrent que les sucres contribuent à eux seuls pour près de 95% dans l'ajustement osmotique. Ils sont reconnus comme étant des paramètres d'adaptation au stress hydrique. Il existe une relation positive qui semble se dégager, en situation de déficit hydrique, entre la capacité d'accumulation des sucres solubles et l'aptitude à maintenir une

teneur relative en eau élevée (Al Hakimi et Monneveux, 1993). L'ajustement osmotique peut être aisément évalué à partir des mesures de potentiel osmotique et de teneur relative en eau, l'accumulation des sucres solubles étant la cause essentielle de la baisse du potentiel osmotique (Rekika, 1997).

D'après Salsac et Monneveux (1991), le potassium (K^+) est le cation majeur accumulé dans la vacuole puisqu'il contribue à lui seul à environ 70% de la réduction du potentiel hydrique (Gate, 1995) à côté de celui-ci, on retrouve également du magnésium (Mg^{++}) et peu de calcium (Ca^{++}). On a pu démontrer un rôle important de l'ion potassium (K^+) dans les phénomènes d'ouverture et de fermeture des stomates. Les quantités transférées de l'ion K^+ peuvent rendre compte de l'augmentation de la pression osmotique observée, donc du phénomène de turgescence (Laval et Maziliac, 1979). Morgan (1992) trouve que le potassium contribue à peu près à 78 % dans l'ajustement osmotique, d'autres solutés inorganiques sont présents en faible concentration et contribuent dans la réponse au stress hydrique. Par ailleurs, Hafez Khan *et al.* (1993) montrent que l'ajustement osmotique est dû à une hydratation élevée ou contenu relatif en eau élevé. En effet, la caractérisation du statut hydrique d'une plante pourrait passer par la seule évaluation de la teneur relative en eau (Rekika, 1997). La teneur relative en eau est étroitement corrélée à l'ajustement osmotique et peut être considérée comme un critère simple de sélection dans un programme d'amélioration génétique, comparée aux potentiels hydrique, osmotique ou de turgescence (Rekika, 1997).

Par ailleurs, il existe une relation entre l'osmorégulation et le rendement en grain chez le blé dur et le blé tendre, la production de grain est faite grâce à une osmorégulation élevée dans 11-17% des cas chez le blé tendre et 7% des cas chez le blé dur (Morgan *et al.*, 1986). Selon Rekika (1997), la corrélation observée entre la capacité d'ajustement osmotique et le rendement en conditions semi-arides des lignées, confirme le rôle de l'ajustement osmotique dans la tolérance au déficit hydrique.

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 également 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). Condon *et al.*, (1990) ont trouvé que les plantes qui se caractérisent par une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (EUE), discriminent moins contre l'isotope ¹³C. Ces plantes intègrent donc plus de ¹³C dans la synthèse de leurs tissus comparativement aux plantes non économes en eau.

4-SIMULATION ET MODÉLISATION

4-1- IMPORTANCE DE L'OUTIL DE SIMULATION

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

L'utilisation de modèles offre plusieurs avantages vis-à-vis de l'expérimentation en conditions réelles. Par exemple, dans une simulation, il est facile de modifier les variables exogènes et le paramétrage du modèle et ainsi contrôler l'environnement de simulation. En outre, les modèles permettent de simuler des écosystèmes complexes mettant en jeu de nombreuses interactions entre les composantes constitutives du système et avec les facteurs biotiques ou abiotiques du milieu (Thornley, 2001). Aussi, la simulation peut souvent fournir une information que l'expérimentation seule n'aurait pas pu offrir, parce que contrainte par le temps et les ressources nécessaires (Soussana *et al.*, 2010).

4-2- CLASSIFICATION GENERALE DES MODÈLES

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

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

En général, les modèles mécanistes (explanatory ou process-based models) décrivent et quantifient les mécanismes et les processus en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié ; tandis que les modèles empiriques (descriptive, predictive models) décrivent l'évolution du système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique. Les équations décrivant les relations sont le plus souvent obtenues à partir d'ajustements statistiques entre les différentes variables d'état mesurées (Passioura, 1996 ; Hammer *et al.*, 2002 ; Jeuffroy *et al.*, 2008).

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

4-3- LA DEMARCHE DANS LA MODELISATION

La figure 5 résume les principales étapes de la modélisation. L'élaboration d'un modèle dépend étroitement des objectifs du modélisateur (et de la problématique de l'étude) ainsi que de sa connaissance du système étudié et des données expérimentales dont il dispose. L'ensemble de ces contraintes permet de définir les échelles spatiale et temporelle du modèle, le niveau de détail (les processus à modéliser) et la méthode de modélisation à employer (Coquillard et Hill, 1997). L'utilité de l'introduction d'une complexité additionnelle dans les modèles n'est pas évidente (Hakanson, 1995), la vraie vertu du modélisateur résidant dans sa capacité à représenter le système étudié avec parcimonie. Très souvent, l'échelle d'étude choisie (spatiale et temporelle) oriente les concepteurs de modèles vers une approche essentiellement descriptive (modèles empiriques) ou bien au contraire principalement explicative (modèles mécanistes) des processus identifiés comme important à modéliser pour l'échelle d'étude considérée (Bolte *et al.*, 2006).

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

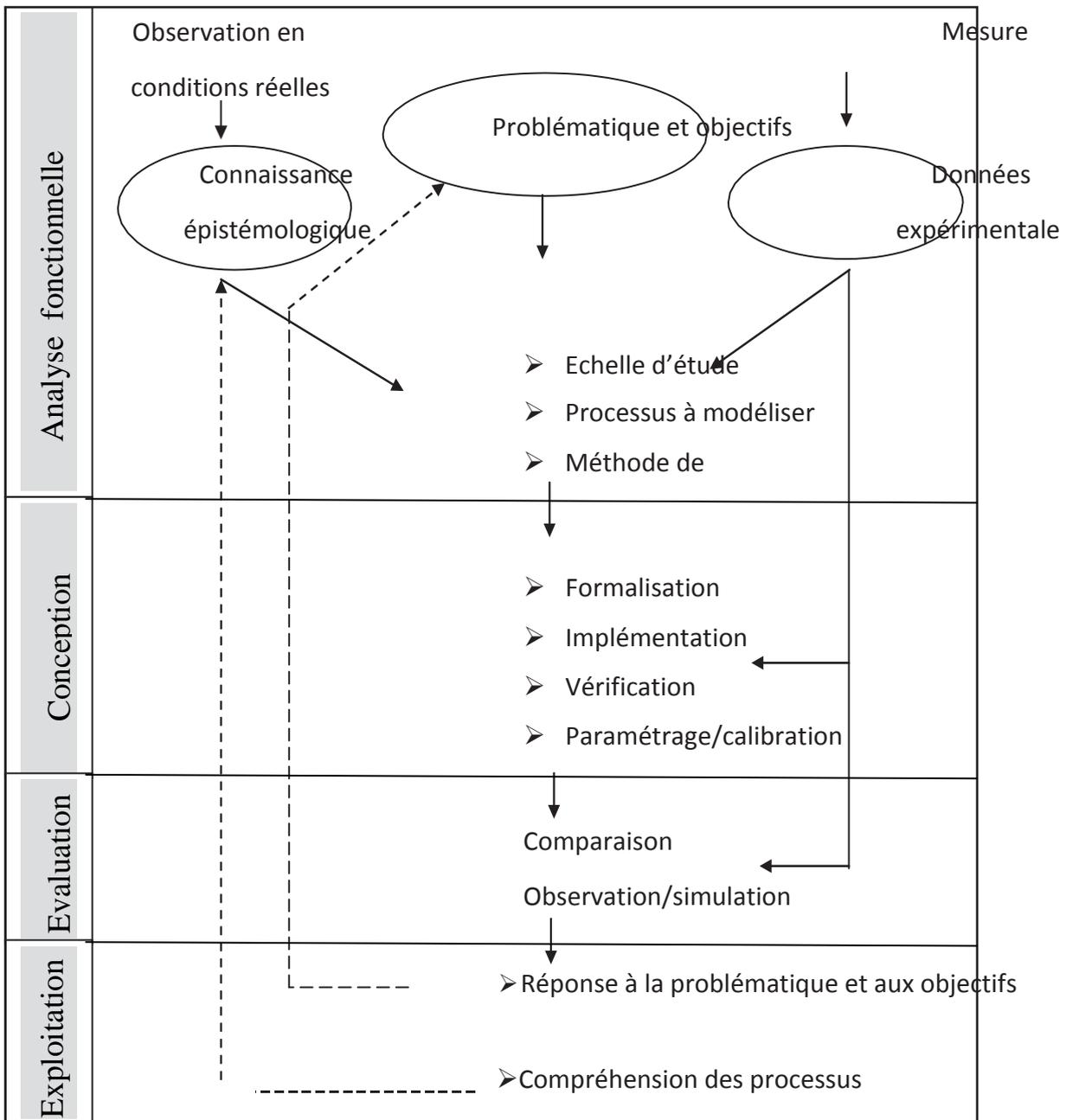


Figure 05 : Etapes de la démarche de modélisation (d'après Coquillard et Hill, 1997).

4-4- LES MODÈLES DE CULTURE

4-4-1- DESCRIPTION, CLASSIFICATION ET UTILISATION

Les modèles de culture sont une représentation simplifiée d'un système, issue d'un certain point de vue et orientée par une certaine finalité (Jeuffroy *et al.*, 2008). Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plante en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état, qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui définissent l'intensité des relations entre les variables d'état du système (Jones et Luyten, 1998 ; Wallach, 2006).

Les modèles de cultures, appelés aussi « modèles écophysologiques », sont des outils qui utilisent des descriptions mathématiques des processus physiologiques, chimiques et physiques, en regroupant le maximum de connaissances disponibles sur la plante (physiologie, environnement, conduite de la culture) dans l'objectif de prédire la croissance, le développement et le rendement de la plante dans le temps et dans des conditions environnementales spécifiques (White et Hoogenboom, 2010).

Wolf, (1993); Rosenzweig and Parry, (1994); Downing *et al.*, (1999) rapportent l'utilité de la simulation dans la prédiction du comportement complexe des cultures. La réponse des cultures aux variations hydriques sont de plus en plus utilisés dans l'évaluation de l'impact possible des changements climatiques sur la sécurité alimentaire. 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 d'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 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.

Les modèles de culture sont physiologiquement basés sur le principe de relations causales entre les différentes fonctions de la plante et son environnement, mais en réalité ils ne peuvent pas prendre en compte toutes les interactions entre l'environnement et le système modélisé et par conséquent, peuvent inclure des hypothèses, en particulier lorsque l'information concernant certains aspects du système est insuffisante, incomplète ou inexistante (Hoogenboom, 2000). Selon la discipline scientifique, il existe différents types de modèles, allant de modèles très simples basés sur une seule équation à des modèles extrêmement avancés qui comprennent des milliers d'équations. Ainsi, les modèles de culture peuvent être classés comme suit :

a- Les modèles de croissance

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

b- les modèles agro-météorologiques

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

c- Les modèles statistiques

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

d- Les modèles empiriques

Ces modèles comprennent des équations ou des relations empiriques pour représenter les différents processus complexes de la plante et leurs interactions avec l'environnement (Baier, 1979; Ritchie, 1998). Parmi les utilisations majeures des modèles de culture figurent l'amélioration de l'information concernant la croissance des plantes dans des conditions environnementales données, et la prévision de l'impact du changement climatique futur sur cette croissance. En effet ces modèles sont l'outil dominant dans les études d'impact du changement climatique sur les agrosystèmes (Gitay *et al.*, 2001; Easterling *et al.*, 2007).

Comme les modèles de cultures sont constitués d'un ensemble d'équations mathématiques formalisant les hypothèses sur le fonctionnement du système sol-plante et regroupées par processus, ils peuvent être considérés comme mécanistes. Cependant, ils peuvent intégrer des relations de type empirique entre les variables caractérisant les différents processus et peuvent être considérés empiriques (Brisson *et al.*, 2006).

e- Modèles génériques et modèles spécifiques

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

Les modèles spécifiques ont été développés en effet, pour la représentation de la croissance et du développement d'une culture donnée, généralement dans l'objectif de répondre à une question précise. Ils intègrent des processus spécifiques à l'espèce concernée et prennent en compte différents facteurs de production en fonction des objectifs d'application. Pour le blé tendre, de nombreux modèles ont été développés dans ce sens. Le modèle ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984) a été développé pour fournir un outil d'identification des facteurs limitant la production de blé tendre au Royaume Unis. Il a ensuite évolué pour intégrer un module de bilan hydrique et azoté (Porter, 1984 in Porter *et al.*, 1993). Le modèle SWHEAT a été développé pour simuler la croissance et le développement du blé tendre de printemps en conditions semi-arides (Van Keulen and Seligman, 1987 in Porter *et al.*, 1993).

Le modèle SiriusQuality1 (Martre *et al.*, 2006), dérivé de SIRIUS (Jamieson *et al.*, 1998) est spécialisé dans la simulation des différentes fractions protéiques du blé tendre. Le modèle AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999 ; Barbottin, 2005 ; David et Jeuffroy, 2009) a été orienté pour évaluer différentes options de fertilisation sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre. Une version AZODYN-ORG a été spécifiquement développée pour l'agriculture biologique (David *et al.*, 2005).

Les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce au travers d'options de simulation et de différentes valeurs des paramètres (Wang et Engel, 2002). Le développement de tels modèles permet de mutualiser les connaissances acquises sur le fonctionnement des espèces et fournissent un cadre d'évaluation pour l'identification des convergences et des différences entre cultures (Brisson *et al.*, 2006). D'un point de vue applicatif, ils permettent de simuler des successions de cultures et sont dès lors en mesure d'évaluer les performances des systèmes de culture et non pas uniquement les performances d'un itinéraire technique. Les modèles APSIM (Keating *et al.*, 2003), CROPSYST (Stockle *et al.*, 2003), APES (van Ittersum *et al.*, 2008) et STICS (Brisson *et al.*, 2003 ; Brisson *et al.*, 2008) ont ainsi été développés dans ces objectifs.

Qu'il s'agisse des modèles spécifiques ou génériques, les différences variétales sont prises en compte au travers de paramètres génotypiques ou encore variétaux (Mavromatis *et al.*, 2001).

Le couplage des modèles de décision aux modèles dynamiques de fonctionnement d'une culture a donné naissance aux modèles biodécisionnels. Ces modèles intègrent ainsi la dynamique de prise de décision de l'agriculteur en réponse à l'évolution du système sol-plante. De tels modèles ont été développés pour l'irrigation du maïs, MODERATO (Bergez *et al.*, 2001), l'irrigation et la fauche des prairies (Merot et Bergez, 2010), le pâturage des prairies (Cros *et al.*, 2001), ou la gestion des interventions techniques du blé (Chatelin *et al.*, 2005).

4-4-2-CHRONOLOGIE ET ÉVOLUTION

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.

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

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

4-4-3- LES QUALITES RECHERCHEES D'UN MODELE DE CULTURE

Afin de fournir des réponses pertinentes aux questions posées, le développement d'un modèle de culture doit aboutir à l'obtention d'un modèle présentant certaines caractéristiques parmi lesquelles la précision, la sensibilité et la robustesse tiennent une place essentielle.

Pour les anglo-saxons, la précision est appréhendée au travers de deux notions : ‘accuracy’ et ‘precision’ (Willmott *et al.*, 1985). Le terme ‘accuracy’ fait référence à la capacité du modèle à obtenir par simulation des valeurs proches des valeurs obtenues par l’expérimentation. La ‘precision’ fait référence au niveau avec lequel un jeu de données simulées représente une fonction linéaire du jeu de données mesurées correspondant.

La sensibilité fait référence à la capacité du modèle à modifier la valeur simulée d’une variable d’état en réponse à la variation d’une ou de plusieurs opérations techniques ou en réponse à la variation des conditions pédo-climatiques (Jeuffroy *et al.*, 2008).

Jeuffroy *et al.* (2008) définissent la robustesse comme la capacité du modèle à ne pas être sensible aux paramètres et aux données qui ne peuvent être facilement appréhendables lors de l’utilisation du modèle. Confalonieri *et al* (2010) considèrent qu’un modèle est robuste dans la mesure où les performances du modèle utilisé dans de nouvelles conditions sont similaires aux performances du modèle utilisé dans les conditions ayant servi à son développement. Pour Welch *et al.* (2002), il s’agit de savoir dans quelle mesure les paramètres des modèles sont valides dans d’autres conditions. La robustesse ne peut alors s’évaluer qu’au travers des conditions d’utilisation du modèle de culture.

4-4-4- ORGANISATION ET CONCEPTION

Comme le montre la figure 06, dans un modèle de culture, la simulation commence par l’introduction d’une série de données spécifiant les conditions initiales environnant la culture, le statut hydrique initial dans le sol, et les paramètres nécessaires pour représenter les caractéristiques physiologiques de la culture.

Pour une culture annuelle, le modèle parcourt une série de sous-programmes (appelés « routines »), qui simulent les processus de la plante ou du sol à un pas de temps horaire ou journalier, émettant en sortie des valeurs intermédiaires à intervalles spécifiés. Les « routines » les plus souvent rencontrées dans un modèle sont: (a) le calcul de la phénologie de la plante en fonction de l’accumulation de température et de la photopériode, (b) calcul de l’accumulation de la matière sèche, (c) calcul du partage et de l’allocation de la matière sèche aux différents organes de la plante, (d) calcul de l’effet des facteurs environnementaux (paramètres climatiques, bilan de l’eau et des nutriments dans le sol), (e) conditions de gestion de la culture, (f) caractéristiques des cultivars utilisés (White et Hoogenboom, 2010).

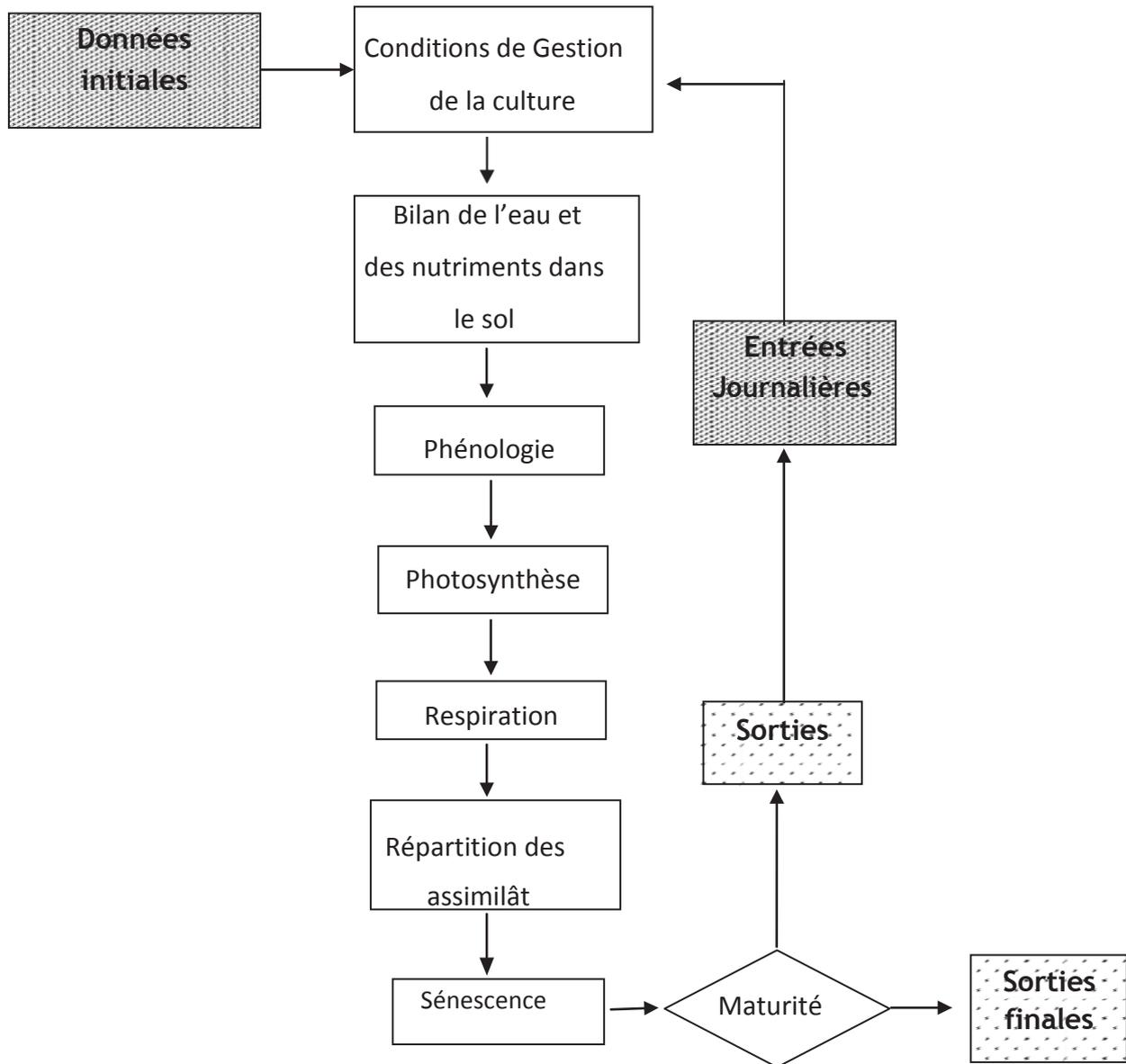


Figure 06 : Organigramme schématisé d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier (source : White et Hoogenboom, 2010).

CHAPITRE II :
MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

1- DESCRIPTION DU SITE EXPERIMENTALE

L'expérimentation a été réalisée pendant cinq campagnes agricoles : 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013, 2014-2015 et 2015-2016 au niveau des parcelles expérimentales de l'institut national de la recherche agronomique d'Algérie (INRAA) de Sétif caractérisées par une position géographique de 36° 9'26.30"N, 5°22'17.78"E, et une altitude de 970m.

Le climat est de type semi-aride supérieur (400-500mm par an). La plus grande partie des précipitations a lieu pendant les mois d'hiver et seulement une partie minimale est répartie sur le reste des mois de la saison. Ce climat est caractérisé par des vents chauds et secs et par des températures estivales de l'ordre de 35°C (Bechtel, 1975)

Les sols de la station sont argilo-limoneux, de pH alcalin, avec une teneur en calcaire total, supérieure à 35%. Le sol du site expérimental se caractérise par une capacité au champ de 25%, un point de flétrissement de 12% et une densité apparente de 1,35 g/cm.

2- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les essais sont mis en place selon un dispositif en blocs complètement randomisés à 3 répétitions, avec des parcelles élémentaires comportant 6 lignes d'une longueur de 2,5 m avec un espace entre les lignes de 0.20m. L'espace entre les micro parcelles est de 40 cm et l'espace entre les blocs est de 1 m.

Le précédent cultural est une jachère travaillée et la densité de semis est de 300 grain/m².

Le semis est réalisé dans les dates suivantes :

- 30 novembre 2010 (campagne 2010-2011)
- 30 novembre 2011 (campagne 2011-2012)
- 07 décembre 2012 (campagne 2012-2013)
- 16 décembre 2012 (campagne 2014-2015)
- 21 décembre 2015 (campagne 2015-2016)

Les dates de récolte sont :

- 27 juin 2011 (campagne 2010-2011)
- 26 juin 2012 (campagne 2011-2012)
- 3 juillet 2013 (campagne 2012-2013)
- 1 juillet 2013 (campagne 2014-2015)
- 6 juillet 2016 (campagne 2015-2016)

Le désherbage chimique est appliqué au stade milieu du tallage par le désherbant Doolper (plus) 2 l/ha qui est anti graminées, et Sekator 0.15 l/ha qui est anti dicotylédones.

3- MATERIEL VEGETAL :

L'étude est réalisée avec une collection de sept variétés de blé dur, issues de sélection CIMMYT/ICARDA et de variétés locales (Tableau 08). Ces variétés ont des potentiels de production et des comportements différents.

Tableau 08 : Nom et origine des variétés semées durant l'expérimentation

Variété	Origine
Oued Zenati	Variété locale lancée en 1936
Altar 84	Variété CIMMYT lancée en 1984
Polonicum	Variété Locale lancée en 1973
Waha	Variété locale, origine génétique ICARDA lancée en 1986
Méxicali 75	Variété CIMMYT lancée en 1975
Hoggar	Variété du sud de l'Espagne, sélection (ITGC de Tiaret)
Bousselem	Sélectionné localement, à partir de CIMMYT/ICARDA

3-1- LA DESCRIPTION DES VARIETES :

- **Waha:**

Est une sélection locale faite à l'intérieur du matériel introduit de l'ICARDA. Elle se caractérise par sa précocité, ce qui la rend sensible au gel tardif, très productive avec une stabilité du rendement élevée et tolérance à la sécheresse (Mziani *et al.* 1993). C'est une variété qui réussit à échapper aux stress de fin de cycle

(Abassene, 1997). Elle présente un épi demi-lâche à compact, roussâtre, la paille est courte et demie pleine. Le grain est moyen, clair ambré à roux. Le PMG est moyen. Le tallage est moyen à fort avec une très bonne productivité. Elle est modérément tolérante aux rouilles, à la fusariose et à la septoriose, sensible au piétin-échaudage. Elle est adaptée aux hauts plateaux et aux plaines intérieures (Bouthiba et Debaeke., 2009).

- **Mexicali 75 :**

Est une variété CIMMYT, elle est caractérisée par sa précocité et par son grain allongé, qui le rend légèrement sensible à la moucheture et au mitadinage. Elle est très productive avec une stabilité du rendement élevée, adaptée aux Hauts plateaux et zones sahariennes (Ait –kaki, 2008).

- **Oued Zenati :**

Est une sélection locale faite à l'intérieure du matériel introduit de l'ITGC (Station de Guelma/1936.). C'est une variété tardive, avec un rendement moyenne. Adapté aux plaines intérieures, son épi est blanc, compact à barbes noirs et longues, sa paille est haute et pleine, le grain est ambré, gros et peu allongé, le PMG est élevé. C'est une variété tardive dont le tallage est moyen, tolérante à la septoriose sensible aux rouilles brunes et jaunes et à la fusariose (Bouthiba et Debaeke., 2009).

- **Polonicum :**

Est une sélection locale, elle est caractérisée par sa tardivité de type hiver. Son grain est jaune terne, gros et allongé, avec un rendement moyen. adaptée aux Plaines intérieur et hauts plateaux (Ait –kaki, 2008).

- **Hoggar :**

Est une variété du sud de l'Espagne, sélection (ITGC de Tiaret/1986), C'est une variété dont l'épi est demi-lâche et blanc. Le grain moyen est roux, le PMG est élevé. La paille ainsi que le tallage sont moyen. Elle est peu sensible à l'helminthosporiose et moyennement tolérante aux rouilles, tolérantes à la verse. Elle est adaptée aux Hauts Plateaux et les zones Sahariennes (Ait –kaki, 2008).

- **Bousselem :**

Sélectionné localement, à partir de CIMMYT/ICARDA, c'est une variété haute de paille, présentant des épis blancs, barbe noire-grise, demi-lâche, long et robuste et hauteur de la plante moyenne de 90 à 100 cm, elle se caractérise par une résistante aux maladies cryptogamiques, mais le traitement des semences aux

fongicides est recommandé aussi une résistance au froid, à la verse, à la sécheresse (Baghem, 2012).

- **Altar 84:** est une variété CIMMYT mexicaine lancée en 1984. Elle possède une bonne qualité industrielle, combinée à un potentiel de rendement élevé, une grande capacité d'adaptation, et une meilleure résistance aux maladies par rapport à Mexicali 75 (Ait-kaki, 2008).

Pour l'étude de la quantification du stress hydrique et la validation du modèle AQUA-CROP, quatre variétés seulement ont été utilisées (Oued Zenati, Bousselem, Altar 84 et Mexicali 75).

4- MESURES ET NOTATIONS EFFECTUEES :

4-1- PARAMETRES CLIMATIQUES :

Les données climatiques utilisées durant la période de l'expérimentation concernent la pluviométrie, les températures minima et maxima, la vitesse du vent, la durée d'insolation et l'humidité de l'air. Elles sont obtenues à partir de la station météorologique proche du site expérimental.

4-2- PARAMETRES PHENOLOGIQUES :

Les notations ont été effectuées par repérage des dates et le nombre de jours, qui correspondent aux stades repères du cycle de croissance du matériel végétal étudié. Il s'agit des stades : levée, épiaison.

Pour la levée, la détermination de la durée de la phase végétative en nombre de jours calendaires comptés à partir de la date du semis jusqu'à l'apparition de 50% de plants levés

La date de réalisation du stade épiaison qui correspond à la sortie de 50% des épis de la gaine de la feuille étendard de la parcelle élémentaire est notée. Cette date sert à la détermination de la durée de la phase végétation (PVG), comptée en jours, de la levée à la date de réalisation du stade épiaison.

4-3- PARAMETRES AGRONOMIQUES :

Sur toutes les stations nous avons noté le nombre de plant levé. A maturité, nous avons récolté les stations séparément. Sur chacune d'elle nous avons estimé la biomasse aérienne, la hauteur, le nombre d'épis.

La fertilité a été calculée sur un échantillon de 05 épis de chaque station. Ces mêmes grains ont été pesés et à l'aide de la règle de trois nous avons calculé le poids de mille grains. Le rendement final a été calculé par peser des grains sur chaque station.

5- LOGICIEL AQUA CROP

5-1- DESCRIPTION DU MODELE AQUACROP

L'estimation de la production qui peut être obtenue en conditions de limitation d'eau est capitale dans les environnements arides, semi-arides et sujets à la sécheresse. Afin de faire face à cette exigence, la FAO a développé un logiciel pour la simulation de la réponse productive des cultures herbacées à la disponibilité hydrique, nommé AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009).

Comme de nombreux autres modèles de croissance des cultures, Aqua-Crop est constitué d'une structure qui comprend quatre sous-modèles: le sol, avec son équilibre hydrique; la culture, avec son développement, sa croissance et son rendement; l'atmosphère, avec son régime thermique, les précipitations, la demande par évaporation et la concentration de dioxyde de carbone (CO₂); et la gestion, avec ses pratiques agricoles majeures telles que l'irrigation et la fertilisation (Geerts *et al.*, 2009).

Par rapport à d'autres logiciels, AquaCrop nécessite un nombre significativement plus faible de paramètres, atteignant un équilibre entre simplicité, précision et robustesse (Araya *et al.*, 2010). AquaCrop simule l'agriculture pluviale, l'irrigation supplémentaire, déficitaire et totale. Les simulations peuvent être conduites en jours ou sur la base du régime thermique. La version finale d'AquaCrop prendra en considération l'azote et la salinité du sol. (Andarzian *et al.*, 2011).

AquaCrop s'adresse aux ingénieurs-conseils, organismes gouvernementaux, ONG et associations d'usagers ; il peut être utilisé comme outil de planification ou d'aide à la décision pour l'agriculture irriguée et pluviale. Le modèle est particulièrement utile :

- pour développer des stratégies d'irrigation dans des conditions de déficit en eau ;
- pour étudier l'effet sur le rendement de l'emplacement, du type de sol, de la date de semis,...
- pour étudier l'effet de différentes techniques de gestion des terres sur le rendement ;
- pour comparer le rendement réel et optimal sur une parcelle, un périmètre ou une région afin d'identifier les contraintes limitant la production de la culture et la productivité de l'eau ;
- pour prédire les impacts du changement climatique sur la production agricole ;
- pour des simulations de scénario et pour la planification par des économistes, les administrateurs et gestionnaires de l'eau (Andarzian *et al.*, 2011).

L'équation du cœur du moteur de Aquacrop est :

$$B=WP.\Sigma Tr$$

Où (B) est la quantité de biomasse aérienne produite ; (Tr) est la transpiration de la culture (en mm) et (WP) est le paramètre de productivité de l'eau (Kg de biomasse par m² et par mm d'eau transpirée et cumulée au cours de la période dans laquelle la biomasse est produite) (Raes *et al.*, 2011)

5-2- LES RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS COMPOSANTS DU MODELE

La figure 07, indique les principales composantes du continuum sol-plante-atmosphère et les paramètres qui commandent la phénologie, le couvert végétal, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final. [I, de l'irrigation; Tn, température minimale de l'air; Tx, température maximale de l'air; ETo, l'évapotranspiration de référence; E, l'évaporation du sol; Tr, la transpiration de la canopée; GS, la conductance stomatique; WP, la productivité de l'eau; IR, l'indice de récolte ; le CO₂, la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique; (1), (2), (3), (4), les fonctions de réponses au stress hydrique, respectivement, de la croissance des feuilles, la sénescence, la conductance stomatique et l'indice de récolte]. Les lignes continues indiquent des liens directs entre les variables et les processus. Les lignes pointillées indiquent les effets rétroactifs.

La teneur en eau dans la zone des racines est simulée à travers la quantification des flux d'eau en entrée et en sortie du système, considérant le sol comme un réservoir d'eau constitué par plusieurs couches. Aqua Crop utilise le pourcentage de couverture du sol au lieu de l'indice foliaire. La réponse de la culture au stress hydrique est modulée par le développement de la couverture foliaire, la conductance stomatique, la sénescence et l'indice de récolte. La simulation de la transpiration détermine l'accumulation journalière de biomasse, au moyen de la productivité de l'eau de la culture. Ce dernier paramètre est normalisé pour l'évapotranspiration de référence et pour le CO₂, permettant de faire des simulations en zones et périodes différentes, ainsi que pour des scénarios climatiques futures (Steduto *et al.*, 2012).

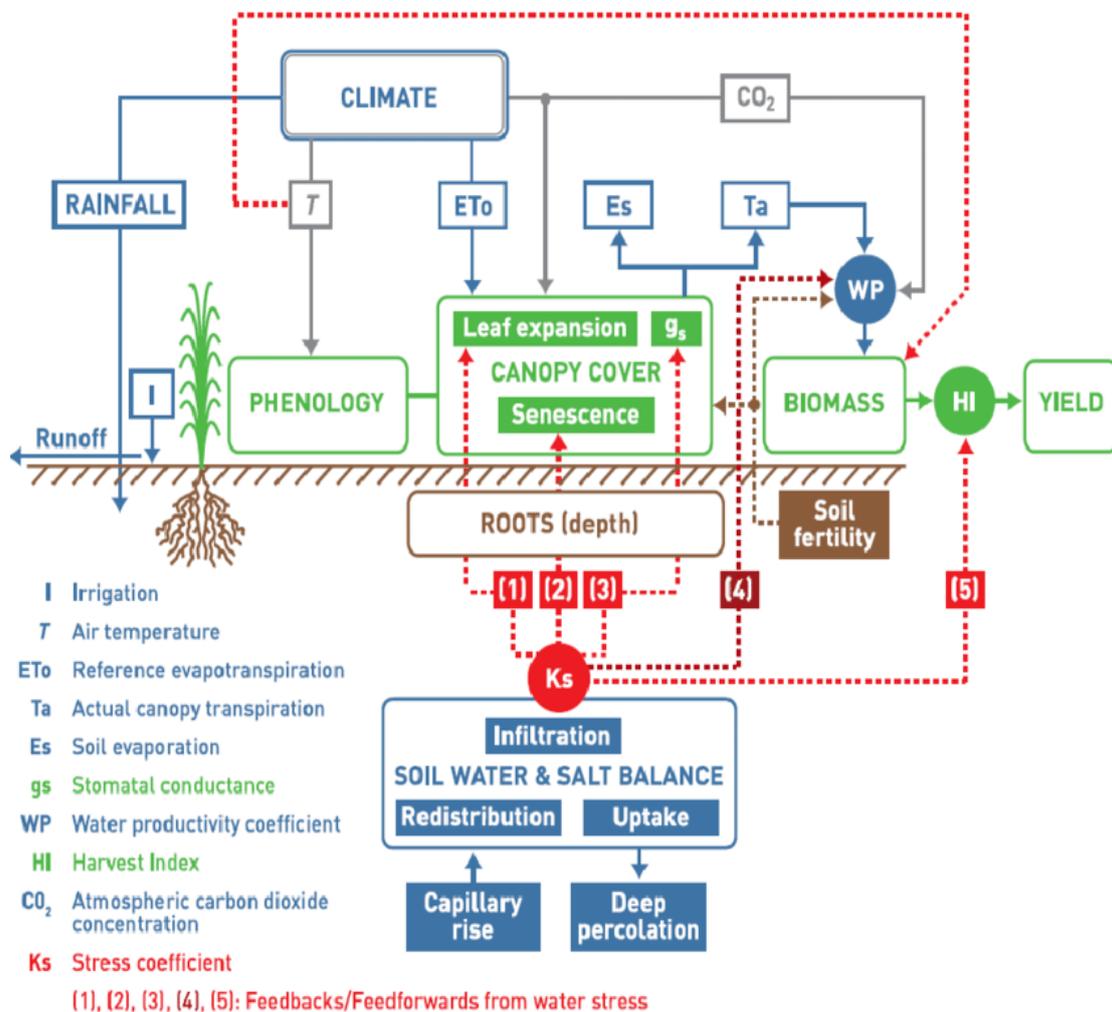


Figure 07: Les relations fonctionnelles entre les différents composants du modèle (Steduto *et al.*, 2012).

Ce modèle a une structure modulaire évolutive. Il est organisé sous forme de plusieurs modules représentant chacun, un ou plusieurs processus liés au système sol-plante-atmosphère. Chaque module fait appel à un certain nombre de sous-programmes (ou sous-modules) traitant des mécanismes spécifiques. Le premier ensemble, intitulé « Environnement », est composé de quatre modules, et a pour but le traitement du climat, de la culture, de la gestion et du composant sol. Le second ensemble est composé de deux modules qui décrivent la période de simulation et les conditions initiales. Enfin, le troisième ensemble, dit « projet », constitue l'étape finale du traitement des données (Figure 08).



Figure 08 : L'organigramme des différents modules du modèle AquaCrop (Raes et al., 2009).

5-3- LES DONNEES D'ENTREES

Selon Raes *et al.*(2009), Aqua Crop utilise un nombre relativement réduit de paramètres explicites et de variables d'entrée (souvent intuitives), qui sont facilement disponibles ou qui nécessitent des méthodes simples pour leur détermination (Figure09).

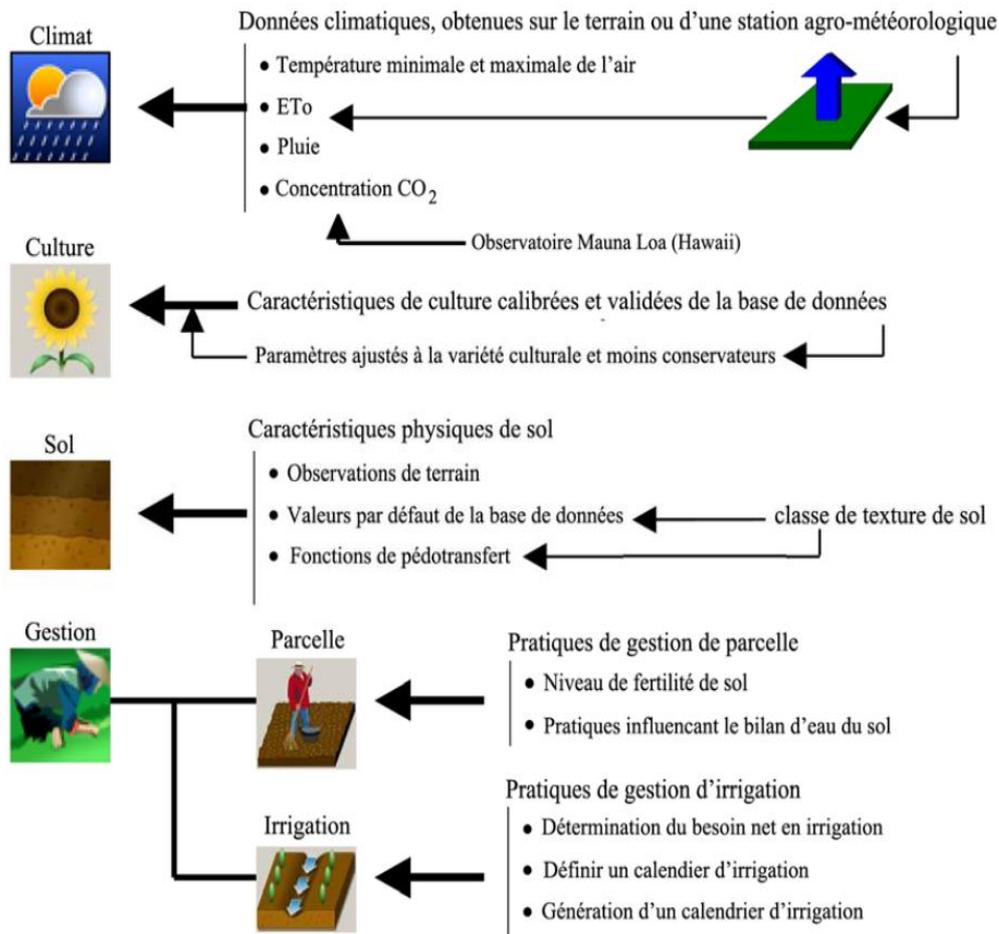


Figure 09: Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer (Raes *et al.*, 2009).

5-3-1- DONNEES CLIMATIQUES

Pour chaque jour de simulation, Aqua Crop a besoin des températures minimale (Tn) et maximale (Tx) de l'air, de l'évapotranspiration de référence (ETo) comme une mesure pour la demande évaporatoire de l'atmosphère et de la pluviométrie. En plus, la concentration moyenne annuelle de CO₂ doit être connue. La température influence le développement de la culture (phénologie) ; la pluviométrie et l'ETo sont déterminants pour le calcul du bilan d'eau de la zone racinaire, et la concentration atmosphérique de CO₂ affecte la productivité de l'eau de la culture.

5-3-2- CARACTERISTIQUES DES CULTURES

Quand une culture n'est pas disponible dans la banque de données, un fichier de récolte peut être créé en spécifiant le type de cultures (fruits ou céréales, les cultures à racines et tubercules, les légumes à feuilles, ou des cultures fourragères) et la durée de son cycle de croissance. Sur la base de cette information, Aqua Crop fournit des valeurs par défaut ou les valeurs de l'échantillon pour tous les paramètres requis. En l'absence d'informations plus précises ces valeurs peuvent être utilisées.

5-3-3- CARACTERISTIQUES DU SOL

Le profil du sol peut être composé d'un maximum de cinq horizons différents de profondeur variable, chacune avec leurs propres caractéristiques physiques. Les caractéristiques hydrauliques sont considérés comme la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et la teneur en eau du sol à saturation (θ_{sat}), la capacité au champ (θ_{fc}), et au point de flétrissement permanent (θ_{PWP}). L'utilisateur peut utiliser les valeurs indicatives fournies par Aqua Crop pour différentes classes de texture du sol, ou l'importation déterminée localement ou dérivée des données de la texture du sol à l'aide de fonctions de pédo-transfert. Si une couche bloque l'expansion de la zone racine, sa profondeur dans le profil du sol doit être précisée.

5-3-4- PRATIQUES DE GESTION

Les pratiques de gestion sont divisées en deux catégories: la gestion des champs et les pratiques de gestion de l'irrigation:

Dans les pratiques de gestion des champs il y a des choix de niveaux de fertilité du sol et les pratiques qui affectent l'équilibre hydrique du sol comme paillage pour réduire l'évaporation du sol, diguettes en terre pour stocker l'eau sur le terrain, et les pratiques culturales telles que le buttage du sol ou contours réduisant le ruissellement de l'eau de pluie. Les taux de fécondité varient de non limitatif jusqu'à pauvres, avec des effets sur le taux de croissance de la couverture végétale, sur la couverture maximale et sur la sénescence.

Dans la gestion de l'irrigation c'est à l'utilisateur de choisir si la culture est pluviale ou irriguée. Si irriguée, l'utilisateur peut sélectionner la méthode d'application (aspersion, goutte à goutte, ou de surface), la fraction de surface mouillée, est à préciser pour chaque événement d'irrigation, la qualité de l'eau d'irrigation, le calendrier et le montant d'irrigation appliquée. Il existe également des options pour évaluer le besoin en irrigation net et de générer des programmes d'irrigation en fonction du temps spécifié et les critères de profondeur. Étant donné que les critères pourraient changer au cours de la saison, le programme fournit les moyens de tester des stratégies d'irrigation déficitaire en appliquant des quantités d'eau choisies à divers stades de développement des cultures (Raes *et al.*, 2009).

5-4- CALIBRATION DU MODELE

Calibrer le modèle consiste à chercher le jeu de paramètres qui permet de minimiser l'écart entre l'état simulé par le modèle et l'état mesuré, en supposant que le jeu d'équation est exact. Valider le modèle consiste à vérifier la bonne prédiction des variables d'état du modèle sur un jeu de données. 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 (Delecolle *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 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 09.

Tableau 09 : Paramètres utilisés dans la calibration du modèle AquaCrop

Paramètres	Valeur
Culture	
Développement	
type de plantation	Semis conventionnel
La densité des jeunes plants	5 cm ² /plants
Densité des plants	200 plants/m ²
La couverture initiale de la canopée	10%
Profondeur d'enracinement maximale	1m
Couverture maximale de la canopée	90%
Declin de la canopée	Déclin très lent
Productivité d'eau	13g/m ²
Indice de récolte de référence	45%
Temperature	
Basse temperature	10
Température supérieure	30
Stress hydrique et sols	
Expansion de canopée	Modérément tolérant au stress hydrique
Fermeture des stomates	Modérément tolérant au stress hydrique
Senescence précoce	Modérément tolérant au stress hydrique
Stress d'aération	Modérément tolérant à l'exploitation de l'eau
Stress de salinité du sol	Non considéré
Production de biomasse affectée par le stress de la fertilité du sol	Non considéré

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).

La proportion du stress hydrique est calculée par la méthode utilisée par Doorenbos et Kassam (1979) :

Stress hydrique (déficit relatif d'évapotranspiration) = 1-(ETA/ETP)

ETR fait référence à l'évapotranspiration réelle des cultures dans des conditions de croissance données et ETP à l'évapotranspiration dans les mêmes conditions, mais sans manque d'eau. Les valeurs du stress hydrique sont entre 0 et 1 ; 0=pas de stress, 1= stress intense.

5-5- EVALUATION DU MODELE :

L'évaluation de performance d'un modèle est importante pour apporter une estimation quantitative de la capacité du modèle à reproduire une variable observée, pour évaluer l'impact du calibrage des paramètres du modèle et comparer les résultats du modèle avec des cas précédents (Krause *et al.*, 2005). Plusieurs indicateurs statistiques sont disponibles pour évaluer la performance du modèle (Loague et Green, 1991). Chacun ayant ses forces et ses faiblesses, c'est à dire que l'utilisation d'un ensemble d'indicateurs différents est nécessaire pour évaluer efficacement la performance du modèle (Willmott, 1984; Legates et McCabe, 1999). Parmi lesquelles on a :

AAE (Average Absolute Error) 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 (Root Mean 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, il 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.

L'indice d'agrément (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 R².

Erreur de prévision (Pe)

La performance du modèle a été évaluée à l'aide de l'erreur de prédiction (Pe) :

$$Pe = \frac{(Si - Oi)}{Oi} \times 100$$

Où : Si et Oi sont les valeurs simulées et observées (mesurées), N est le nombre d'observations, \bar{O}_i et \bar{S}_i sont les moyennes des valeurs de Oi et Si.

Coefficient de corrélation (r)

Le coefficient de corrélation est un indicateur du degré de proximité entre les valeurs observées et les valeurs estimées du modèle. Les valeurs observées et simulées sont mieux corrélées si le coefficient de corrélation se rapproche à 1. Si les valeurs observées et prédites sont soit complètement indépendantes elles ne sont pas corrélées alors r sera nul (Mutreja, 1990). Le coefficient de corrélation a été estimé par l'équation suivante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)(S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}}$$

6- ANALYSES STATISTIQUE :

Réalisée par les logiciels suivants :

- **Costat** : a été utilisés pour les analyses de variance et la comparaison de moyennes. Costat Version 6.4 (1998-2008)
- **Statistica** : a été utilisé pour la création de table de matrice et voire les corrélations entre les paramètres mesurés version 8.0 (2007).
- **Excel** : pour la rédaction des tableaux et créations de diagrammes, courbesVersion 2013.

CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSION

1- ETUDES DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES

1-1- LA PLUVIOMETRIE

La comparaison de la pluviométrie entre les cinq saisons d'étude (de 2010 à 2016) montre de grandes différences sur le plan de la quantité et de la répartition (Figure 10).

On a pu constater, en effet, que la campagne 2010/2011 est la plus pluvieuse avec 98 jours de précipitations enregistrées et un cumul des précipitations de décembre à juin 2011 de 312,3 mm. Décembre, janvier et juin sont les mois, les moins pluvieux, respectivement : 20 ; 13,33 et 17,4 mm. Le mois d'Avril a enregistré 73.8 mm de pluie, alors que le pic a été enregistré au mois de février avec 81,04 mm.

Le cumul de pluie durant le cycle cultural de la saison 2011/2012 est 241,04 mm. Il est reparti d'une manière irrégulière, ou les grandes valeurs de précipitation coïncident avec les mois de février (64,25 mm) et d'avril (79,5) ; et la pluviométrie est faible durant les mois de mars (14,22mm), mai (6,1 mm) et juin (14,98).

Pour la campagne 2012/2013, on a enregistré 93 jours de précipitations avec un cumul de 262.64 mm. Décembre, mars, et juin représentent les mois les moins pluvieux avec respectivement 5,84 ; 29,22 et 2,03mm. La plus grande quantité de précipitations a été enregistrée pour le mois de janvier, avec 77.21 mm.

Le cumul de pluie durant le cycle cultural de la saison 2014-2015 est de 325,04 mm. Il est reparti d'une manière irrégulière, ou les grandes valeurs de précipitation coïncident avec la saison d'hiver est de 61,97 mm pour décembre ; 68,84 pour janvier ; et 60,95 pour le mois de février. La pluviométrie est rare durant le mois d'avril (5,08mm).

La campagne 2015/2016 est la moins pluvieuse avec un cumul de 216,66 mm. Les mois les moins pluvieux sont janvier et juin avec respectivement 17,27 et 10,16 mm, et la pluviométrie est nulle ou totalement absente pendant le mois décembre (0 mm). Le pic a été enregistré pour le mois de mars avec une quantité de 73,66mm.

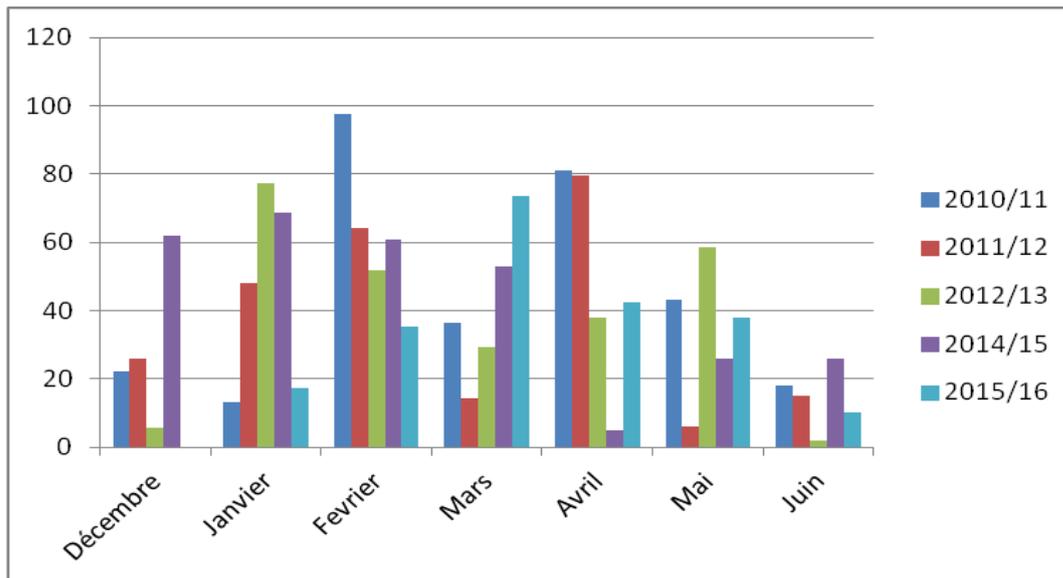


Figure 10 : Pluviométrie saisonnière des campagnes 2010-2016.

Ces résultats indiquent la grande variabilité climatique, d'ordre pluviométrique, à laquelle est soumise la production du blé dur sous les conditions des hautes plaines orientales. Ils montrent aussi que la contrainte hydrique, de nature intermittente, est doublement variable, du point de vue de l'intensité et du positionnement le long du cycle de la culture. Ceci complique davantage l'identification du stade végétatif pour lequel, il faut chercher la tolérance génétique au manque d'eau. Il faut cibler, également, une tolérance globale présente tout au long du cycle végétatif.

1-2- LA TEMPERATURE

Les températures moyennes mensuelles de nos cinq saisons d'études (de 2010 à 2016) du site expérimental sont similaires (Figure 11). On constate qu'il y a des différences entre les mois de chaque saison où les températures les plus basses correspondent aux mois d'hiver, décembre, janvier et février, et les températures les plus élevées concernent les mois du début de l'été c'est-à-dire mai et juin.

Un autre constat s'impose : le mois de février de la campagne 2011/2012 est considéré comme le mois le plus frais avec une température moyenne journalière trop basse allant jusqu'à $-1,5^{\circ}\text{C}$ alors que le mois de juin a été le plus chaud pour les campagnes 2010/2011 et 2015/2016 avec des températures moyennes journalières allant presque à 35°C .

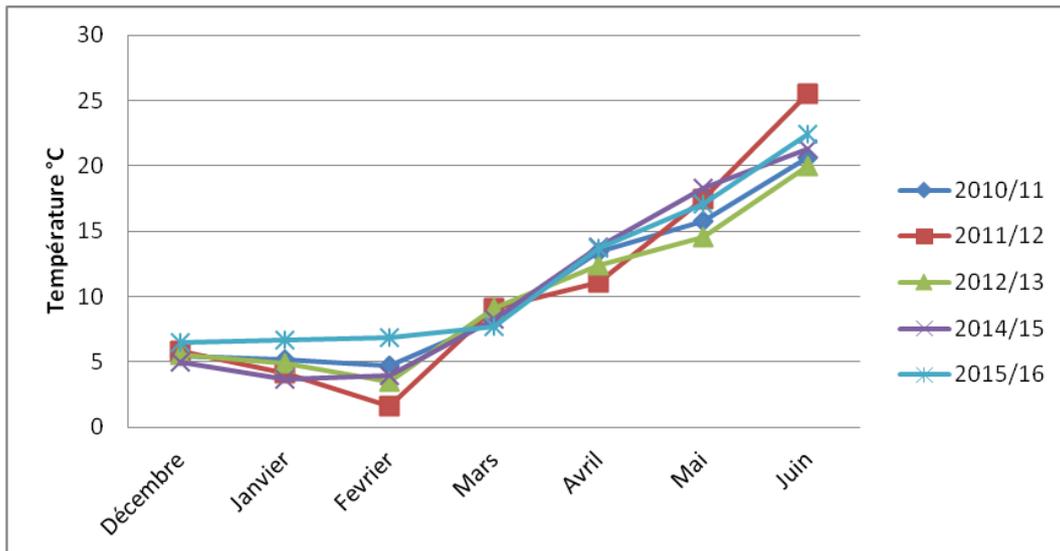


Figure 11 : Températures mensuelles du cycle végétatif des campagnes 2010-2016

A l'inverse du cumul pluviométrique, la température moyenne mensuelle présente une distribution bimodale, basse au cours des stades végétatifs, tallage, montaison, gonflement et élevée au cours de la floraison, au cours du remplissage du grain aussi et notamment pendant la phase d'installation de la culture (semis - début tallage) (Figure 11).

D'après le diagramme ombrothermique (Figure 12), réalisé à partir des moyennes des températures et des précipitations de nos cinq campagnes (de 2010 à 2016) ; on observe que la période de sécheresse commence au début du mois de mai et que la période humide s'étend de décembre jusqu'au mois de mai aussi.

Concernant la température moyenne, on enregistre une diminution à partir du mois de décembre (environ 5,68°C) jusqu'au mois de février (environ 4,14°C), puis elle remonte progressivement, vers le mois de mars jusqu'au mois de juin (environ 21,96°C). Cette augmentation de la température coïncide avec la phase de remplissage des grains.

Il est à souligner que cette variation de la température limite la croissance de la végétation au cours de la période où généralement le sol est humide et accélère la croissance à un moment où la contrainte hydrique est plus présente. Ces résultats suggèrent que la sélection doit cibler des génotypes qui tolèrent les basses températures au cours de la phase végétative et les températures élevées au cours de la phase de reproduction.

Pour une année moyenne, l'essentiel des pluies associées à des températures basses sont enregistrées en saison d'hiver jusqu'au début du printemps. A partir de cette date, les pluies deviennent rares et la température de l'air s'élève rapidement. De ce fait, ces deux facteurs climatiques deviennent, des contraintes à la croissance de la plante (Mekhlouf *et al.* 2006).

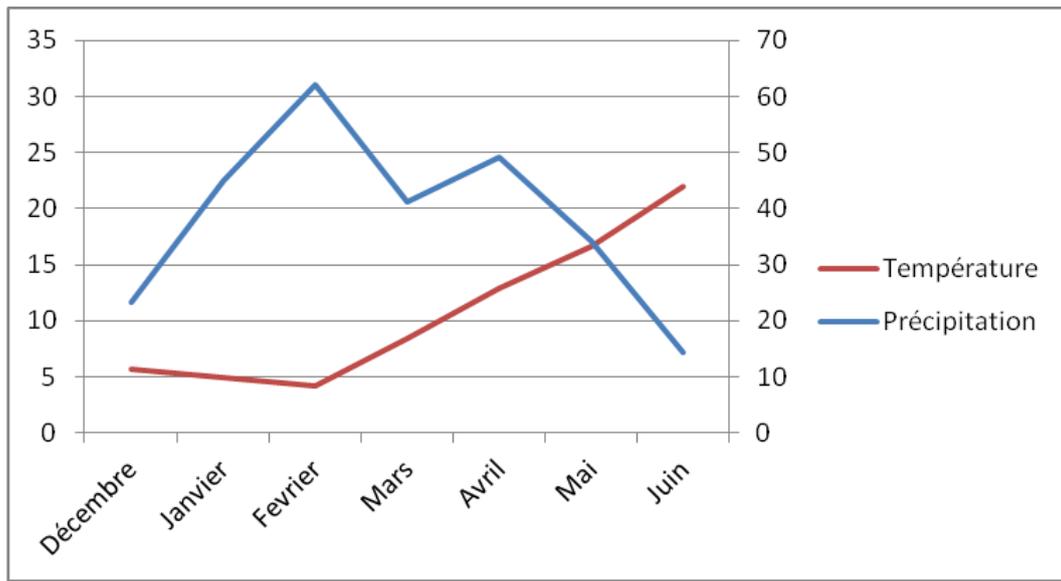


Figure 12 : Diagramme de la variation de la température et des précipitations des campagnes 2010-2016.

2- ETUDE DU COMPORTEMENT AGRONOMIQUE

Du point de vue de la sélection, les variables qui s'expriment tôt dans le cycle et qui différencient les génotypes ou lignées sous sélection sont intéressantes à connaître parce qu'elles permettent de faire une sélection précoce qui à son tour, sert à cibler un plus grand nombre de matériel végétal.

Le stade épiaison est une importante étape dans le cycle de vie de la plante. C'est en effet, à ce stade que l'architecture de la plante devient apparente, indiquant le potentiel de rendement (Abbassenne *et al.*, 1998). L'itinéraire de formation du rendement suit une cinétique qui débute par la formation des épis, suivi des sites des graines par épi. Il se termine par le remplissage des graines. Les stress précoces affectent la formation des épis et les sites des grains par épi ; alors que les stress les plus tardifs affectent beaucoup plus le poids individuel de grain et le nombre de grains formés par unité de surface ensemencée (Fischer, 1985).

2-1- NOMBRE D'ÉPI PAR M² (NE/m²)

L'analyse de variance montre qu'il y a une différence très hautement significative pour l'effet campagne, génotype et interaction campagne X génotype concernant le peuplement épi, avec un coefficient de variation de 4,42% (Tableau 10).

L'étude de l'évolution de la moyenne annuelle du nombre d'épis/m² au cours de nos cinq campagnes (2010-2016) révèle une grande variation entre les années avec l'émergence de cinq groupes homogènes avec le test PPDS à 5% (Tableau 11), et cela est principalement dû aux conditions pédoclimatiques. Notant que c'est la campagne 2014-2015 qui a donné les meilleurs résultats avec 527,62 épis/m². En revanche, la campagne 2015-2016, considérée déjà comme une année de sécheresse, a enregistré le plus faible peuplement d'épis avec 111,74 épis/m (Tableau 11).

Le stress hydrique peut réduire alors 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 *et al.*, 1993; Simane *et al.*, 1993; Abayomi et Wright, 1999).

Tableau 10: Carré moyen de l'analyse de la variance des composantes du rendement

Source de variation	Carré moyen			
	ddl	NE/m ²	NG/m ²	PMG (g)
Campagne	4	517867,72***	3,23 ***	857,66***
Génotype	6	3988,67 ***	24698728***	54,22 ***
Campagne X génotype	24	6630,87***	12682763***	47,84 ***
CV (%)		4,42	0,36	4,85

NE/m²: Nombre d'épis/m², NG/m²: Nombre de grains/m² PMG: Poids de mille grains. *** : significatif au seuil de 0.1%

La moyenne de l'effet génotype du nombre d'épis/m² de nos sept variétés est 303,63 épis /m². En comparant les moyennes avec le test PPDS à 5%, deux groupes homogènes se distinguent : le premier est constitué par les variétés Waha, Altar84, Mexicali75 et Hogar, qui ont les meilleurs valeurs allant de 316,32 épis/m² à 311,43 épis/m²; le deuxième groupe renferme les variétés Bousselem, Oued Zenati et Polonicum qui enregistrent les plus faibles peuplements d'épis avec respectivement 289, 88 épis/m², 289,77 épis/m² et 280,64 épis/m² (Tableau 11).

Dans ce même contexte, Moragues *et al.*,(2006) notent que les génotypes évoluant dans les régions froides et humides produisent plus de talles par rapport aux génotypes des régions plus sèches (comparaison faite entre les variétés de la rive nord et sud de la méditerranée).

Tableau 11 : Valeurs moyennes des composantes du rendement pour les campagnes et génotypes.

Campagne	NE/m ²	NG/m ²	PMG (g)
2010/11	276,45 ^c	10830,68 ^c	53,55 ^a
2011/12	235,6 ^d	9282,33 ^d	34,85 ^e
2012/13	393,83 ^b	13547,79 ^b	44,09 ^b
2014/15	527,62 ^a	13302,51 ^a	44,33 ^c
2015/16	111,74 ^e	3713,25 ^e	39,63 ^d
Moyenne	309,04	10135,31	43,29
PPDS 5%	8,27	22,02	1,31
Génotypes			
Altar 84	316,32 ^a	10542,04 ^c	43,71 ^b
Mexicali 75	316,32 ^a	10247,02 ^d	40,94 ^c
Hoggar	311,43 ^a	10954,91 ^b	43,59 ^b
Bousselem	289,88 ^b	9760,36 ^e	45,58 ^a
Waha	321,03 ^a	11200,48 ^a	43,29 ^b
Polonicum	280,64 ^b	8066,66 ^g	45,84 ^a
Oued Zenati	289,77 ^b	8115 ^f	46,40 ^a
Moyenne	303,63	9840,92	44,19
PPDS 5%	9,8	26,06	1,56

NE/m²: Nombre d'épis/m², NG/m² : Nombre de grains/m², PMG: Poids de mille grains. Les moyennes suivies par la ou les même(s) lettre (s) ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Un déficit hydrique à la montaison se traduit par la chute du nombre d'épis par m², par la régression intense des talles et la réduction du nombre de grains par épi, et notamment par l'augmentation du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité du pollen (Slama *et al.*, 2005). Benbelkacem et Kellou (2001) estiment que l'apparition du déficit hydrique au début de la montaison réduit de 10 à 25% le nombre d'épis. Ben Salem *et al.*, (1991) rapportent, eux, que dans les zones arides, le rendement est plus lié au tallage d'épis qu'au tallage herbacé. Ceci 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.

L'étude des coefficients de corrélation, au cours de notre expérimentation, indique que le nombre d'épis m^{-2} est lié positivement au nombre de grains m^{-2} ($r=0,89$), et négativement au poids de mille grains ($r = - 0,83$) (Figure13).

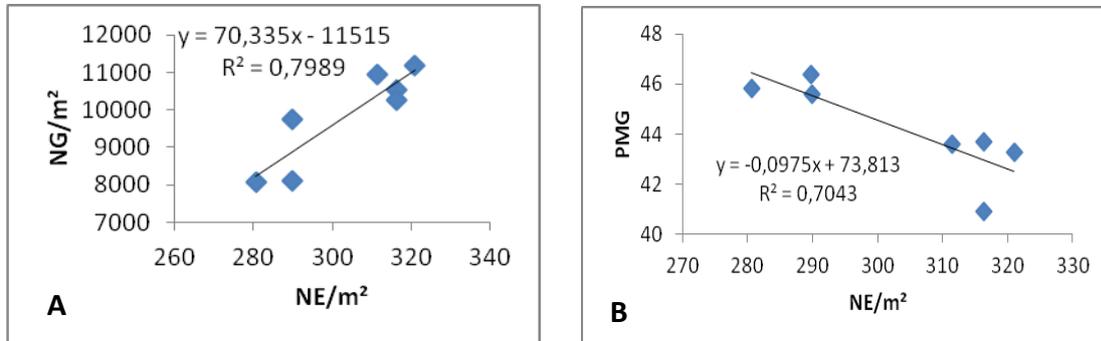


Figure 13 : Relation entre le nombre d'épis m^{-2} avec le nombre de grain m^{-2} (A) et avec le poids de mille grains (B).

L'effet de compensation entre composante du rendement, (suggérant que l'augmentation de l'un se fait souvent au détriment de l'autre), rend souvent l'effet des stress moins visible, ainsi une forte réduction des épis produits par m^2 et compensée par une augmentation de la fertilité des épis voire par celle du poids du grain, de même une réduction des grains produits par m^2 est compensée par une augmentation du poids individuel du grain (Wardlaw, 2002 ; Bahlouli *et al.*, 2005).

La réalisation par un génotype donné d'un nombre d'épis/ m^2 élevé concomitant un nombre de grains/épi élevé n'est possible que si la valeur prise par la première composante à se former (le nombre d'épis/ m^2) est relativement faible comparativement au potentiel. Ceci suite à l'effet de compensation qui lie ces deux composantes et qui est le plus souvent de type négatif (Maazouz, 2006)

2-2- NOMBRE DE GRAINS PAR M^2 (NG / m^2)

Le rendement en grains intègre deux composantes majeures, le nombre de grains / m^2 et le poids moyen du grain (Slafer et Rawson, 1994). Dans notre essai, l'analyse de variance montre que la variable nombre de grain m^{-2} a une différence significative au seuil de 0,1% pour les effets année, génotypes et leur interaction ; avec un coefficient de variation de 0,36% (Tableau 10).

La figure 14 représente l'évolution du nombre de grain/m² au cours de nos cinq campagnes d'expérimentation, où on constate une fluctuation entre années (cinq groupes homogènes lors de la comparaison des moyennes) avec des valeurs moyennes supérieures pour les campagnes 2012-2013 et 2014-2015 (13574,79 et 13302,51 gr/m² respectivement). La campagne 2015-2016, caractérisée par un effet de stress hydrique important ou assez élevé, enregistre le nombre moyen de grain par m² le plus faible (3713,25) (Tableau 11).

Shanahan *et al.* (1984) indique que la variation dans le rendement grain, au sein du même environnement où entre environnements différents, est plus liée au nombre de grains qu'avec le poids du grain, mais une réduction dans le poids des grains est plutôt plus probable qu'une baisse du nombre de grains en période post anthèse en conditions de sécheresse (Fischer et Maurer, 1978).

Fischer (1985) a montré que la période critique pour l'élaboration du nombre de grains se situe 20 jours avant l'anthèse. D'autres études ont confirmé ce même résultat et étendent cette période critique à 10 jours après l'anthèse (Savin et Slafer, 1991; Ortiz-Monasterio *et al.*, 1994; Abbate *et al.*, 1995, 1997).

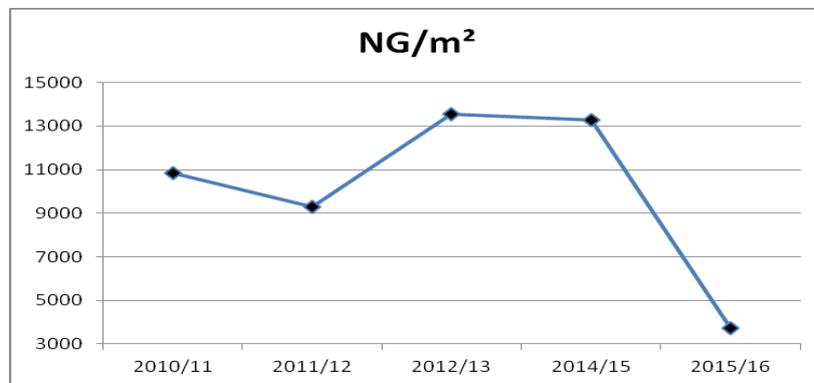


Figure 14 : Evolution du nombre de grain/m² durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).

La comparaison des moyennes du nombre de grains / m² entre nos sept génotypes, par le test PPDS à 5%, montre une grande dissemblance avec l'apparition de sept groupes homogènes. La moyenne générale est de 9840,92 grains / m². Ce sont les variétés sélectionnées localement qui donnent le plus de graines par m² surtout les variétés Waha (11200,4 gr/m²) et Hoggar (10954,9 gr/m²), contrairement aux variétés locales qui enregistrent des valeurs faibles avec 8114,9 gr/m² pour Oued Zenati et 8066,6 gr/m² pour la variété Polonicum (Tableau 11).

Comme le rendement grain est fortement corrélé avec le nombre de grains produits par unité de surface de sol, ce paramètre est donc un facteur limitant l'obtention de hauts rendements grains. Thorne et Wood (1987) ainsi que Vargas *et al.* (1999) mentionnent que l'amélioration de l'activité photosynthétique, tout juste avant l'anthèse, conduit à l'augmentation de ce paramètre (le NGM²) et du rendement grain. La période pré-anthèse est donc importante pour la matérialisation du nombre de grains produit par m² et du rendement grain.

Dans le contexte de notre étude, on observe des corrélations significatives positivement entre le nombre de grains/m² avec le nombre d'épis /m² ($r = 0,89$), avec le rendement ($r = 0,83$) ainsi qu'avec l'indice de récolte ($r = 0,96$) (Figure 15).

Maamri (2011), trouve que les génotypes améliorés présentent un nombre de gains/m² élevé comparés aux génotypes locaux. Ceci peut s'expliquer d'une part, par la bonne fertilité des génotypes introduits ; qui est en moyenne de 36,38 grains/épis alors que pour les deux génotypes locaux, elle est de 31,18 grains/épis, et d'autre part, par le fait que les génotypes améliorés produisent plus d'épis par unité de surface qui est en moyenne de 299,37 épis/m², comparés à Oued Zenati et Polonicum, avec seulement 246,87 épis/m². En effet, on observe une corrélation entre le nombre de grains/m² et la fertilité ($r = 0,75$) ; aussi, entre le nombre de grains/m² et le nombre d'épis/talle ($r = 0,61$) ainsi qu'entre le nombre de grains/m² et le poids spécifique de la feuille drapeau ($r = 0,78$). Parmi les paramètres qui sont corrélés négativement avec le nombre de grains/m² on note également: la hauteur ($r = -0,89$), le PMG ($r = -0,93$) et la surface foliaire de la feuille drapeau ($r = -0,92$).

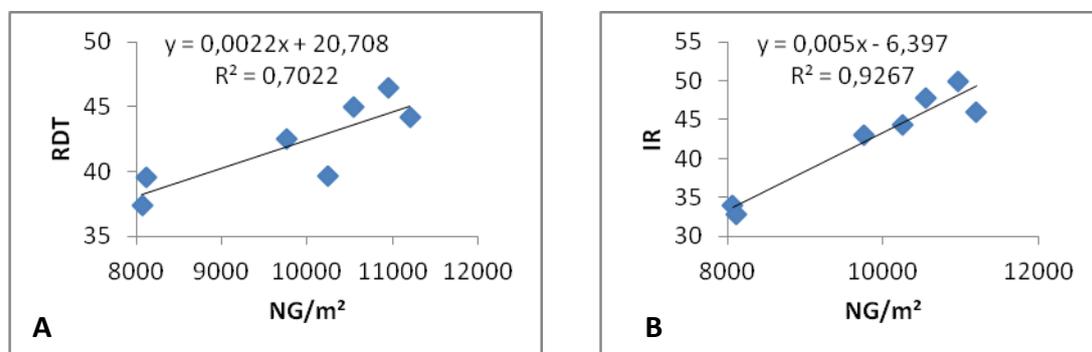


Figure 15 : Relation entre le nombre de grains m⁻² avec le rendement (A) et avec l'indice de récolte (B).

2-3- LE POIDS DE MILLE GRAINS (PMG)

Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), le rendement en grains maximal résulte de l'équilibre optimal entre le nombre d'épis par unité de surface, le nombre de grains/épi et le poids des grains (Prystupa *et al.*, 2004).

Les effets campagne, génotype et interaction campagne X génotype présentent une différence très hautement significative, avec le test ANOVA, pour la variable poids de mille grains. Le coefficient de variation est de 4,85% (Tableau 10).

En comparant les moyennes annuelles du paramètre poids de mille grains avec le test PPDS à 5%, cinq groupes homogènes se distinguent. La moyenne générale interannuelle est de 43,29 g. Il est à constater que la première campagne (2010-2011) est la meilleure (53,55 g) en matière de ce paramètre alors que la deuxième (2011-2012) est la plus faible avec 34,85 g. La troisième (2012-2013) et la quatrième campagne (2014-2015), ont, quant à elles, des valeurs moyennes de PMG presque analogues avec 44,09 g et 44,33 g respectivement (Tableau 11).

Le poids du grain est négativement influencé par les températures élevées et la sécheresse durant la maturation (Chmielewski et Kohn, 2000). Golabadi *et al.*, (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.

Concernant le comportement variétal, de nos sept génotypes, vis-à-vis le poids de mille grains durant nos cinq campagnes d'étude, le test PPDS à 5% montre la présence de trois groupes homogènes : D'abord, le groupe comprenant les variétés locales (Oued Zenati et Polonicum) et la variété Bousselem se distingue en premier, avec les meilleures valeurs (46,4, 45,84 et 45,58 g respectivement). Ensuite, en deuxième position, on trouve le groupe des variétés sélectionnées localement avec des valeurs intermédiaires (43,6 g pour Hoggar et 43,29 g pour Waha). Enfin, La variété introduite Mexicali75 se classe en dernier, avec un PMG de 40,94 g. La moyenne générale inter-variété pour la variable poids de mille grains est 44,19 g (Figure 16).

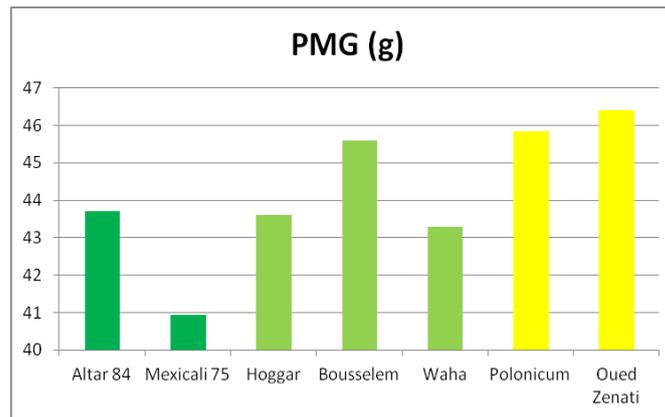


Figure 16 : Histogramme de la moyenne du poids de mille grains des variétés étudiées.

Dans notre étude, le poids de mille grains est négativement corrélé avec le nombre d'épis/m² ($r = -0,83$) (Tableau 12). Ce résultat corrobore avec les travaux de Slafer et Rawson (1994), qui estiment qu'un faible poids des grains associé à un nombre élevé de grains/m² n'est pas seulement dû à une faible quantité d'assimilat par grain, mais, c'est le résultat d'un nombre élevé de grains/épi avec un faible potentiel du poids du grain. D'après Freeze et Bacon (1990), ces composantes du rendement ont une action interdépendante et sont en mesure de se compenser les unes les autres afin de stabiliser le rendement en fonction du changement des conditions environnantes.

Sous conditions contraignantes, lorsque le génotype n'arrive pas à produire un nombre élevé de grains m⁻², il compense par une augmentation du poids de 1000 grains. Le degré de cette compensation, pour minimiser la baisse du rendement en grain, est variable selon les génotypes (Bahlouli, 2006).

Au cours de notre première campagne 2010-2011, une relation négative et significative lie le PMG avec le nombre de grains/m² et avec le rendement ($r = -0,86$ et $r = -0,79$ respectivement) (Tableau 12). Ceci coïncide avec les travaux de Rouabhi (2008), montrant une association entre le rendement grain et le PMG de l'ensemble des variétés de blé dur testées en milieu semi-aride ($r = -0,541$). Housley *et al.*, (1982); Bruckner et Frohberg, (1987) ; notent l'absence de relation significative entre le rendement et le PMG. Elhani *et al.*, (2007) rendent cette association en conditions pluviales au stress hydrique en post anthèse et particulièrement lors du remplissage grain. Del Blanco *et al.*, (2001) et Ozturk et Aydin (2004), affirment l'existence d'une corrélation positive entre le PMG et le rendement.

Tableau 12: Coefficient de corrélation entre le PMG et les caractères mesurés

	NE/m ²	NG/m ²	RDT	BIO	IR
2010/11	-0,39	-0,86*	-0,79*	0,32	-0,54
2011/12	-0,43	-0,75	-0,29	0,79*	-0,79*
2012/13	0,00	-0,50	0,14	0,61	-0,86*
2014/15	-0,25	-0,57	-0,04	0,50	-0,11
2015/16	0,04	0,38	0,86*	-0,16	0,31
Global	-0,83*	-0,75	-0,50	0,71	-0,68

NE/m² : Nombre d'Epis/m², NG/m² : Nombre de Grains/m², RDT : Rendement en grains, BIO : Biomasse aérienne, IR : indice de récolte. * Significatif au seuil de 5%.

2-4- RENDEMENT GRAIN (RDT)

Un haut rendement est la résultante de la capacité de la plante à faire une bonne utilisation des eaux de pluie pour produire du grain. Il est aussi le résultat d'une répartition équilibrée de la matière sèche accumulée entre les parties grain et paille, débouchant sur la production d'un nombre élevé de grains/m² qui se manifeste surtout chez les génotypes réussissant une bonne fertilité épi (Maazouz, 2006)

L'analyse de variance montre des effets année, génotypes et interaction année X génotype significatifs au seuil de 0,1% au cours de notre expérimentation, avec un coefficient de variation égale à 2,05 % (Tableau 13).

La moyenne de l'effet campagne du rendement grenier au cours de notre étude est de 42,23 qx/ha, et la PPDS est de 0,53 formant cinq groupes homogènes. On remarque que les meilleurs rendements correspondent à la première (2010-2011) et à la quatrième saison (2014-2015) avec respectivement 57, 71 et 58,82 qx/ha. En revanche, les faibles rendements sont obtenus pendant la deuxième saison (2011-2012) (31,52 qx/ha) et la dernière, en particulier (2015-2016), où on n'a pu récolter que 14,82 qx/ha. La sévérité du stress hydrique qui a marqué cette saison en est la cause principale (Tableau 14).

Tableau 13: Carré moyen de l'analyse de la variance des variables post- récolte

Source de variation	Carré moyen			
	ddl	RDT (Qx/ha)	BIO (Qx/ha)	IR (%)
Campagne	4	7493,67***	14863,82***	594,68***
Génotype	6	166,55 ***	1132,29 ***	659,59***
Campagne X génotype	24	282,92 ***	631,75 ***	82,78***
CV (%)		2,05	1,027	3,21

RDT : Rendement en grain, BIO : Biomasse aérienne, IR : Indice de récolte. *** : significatif au seuil de 0.1%

Selon Bahlouli (2006), l'effet année est de loin d'être le facteur, qui absorbe la plus grande part de la variation observée. Ceci indique que les différences entre années ou campagnes agricoles sont donc plus importantes comparativement aux différences observées entre les génotypes étudiés, et que le choix d'un génotype donné, sur la base d'une ou plusieurs des variables mesurées, doit donc se faire par année et non en moyenne des six campagnes testées. Ceci à cause de l'effet de l'interaction génotype x année qui est significative. Le même auteur, indique que les génotypes avec un $b > 1$ sont très risqués lors des années peu favorables à l'expression du rendement. De tels génotypes perdent leur capacité de production à des potentialités de production du milieu où d'autres génotypes, notamment ceux avec un $b = 1$ et surtout ceux ayant un $b < 1$, donnent un rendement en grain acceptable sous de telles conditions de croissance (b est le coefficient de régression « Finlay & Wilkinson, 1963 » pour mesurer la stabilité).

Tableau 14 : Valeurs moyennes des paramètres post-récolte mesurés pour les campagnes et génotypes.

Campagne	RDT (Qx/ha)	BIO (Qx/ha)	IR (%)
2010/11	57,71 ^b	112,11 ^d	51,81 ^a
2011/12	31,52 ^d	75,8 ^e	41,58 ^b
2012/13	48,3 ^c	120,6 ^b	40,71 ^c
2014/15	58,82 ^a	149,25 ^a	39,39 ^{cd}
2015/16	14,82 ^e	122,27 ^c	39,06 ^d
Moyenne	42,23	116	42,51
PPDS 5%	0,53	0,73	0,84
Génotypes			
Altar 84	45,01 ^b	115,21 ^c	47,84 ^b
Mexicali 75	39,69 ^e	114,20 ^d	44,37 ^d
Hoggar	46,46 ^a	115,08 ^c	49,84 ^a
Bousselem	42,47 ^d	108,68 ^e	43,01 ^e
Waha	44,23 ^c	106,40 ^f	45,99 ^c
Polonicum	37,37 ^f	127,90 ^b	33,94 ^f
Oued Zenati	39,60 ^e	128,80 ^a	32,90 ^g
Moyenne	42,12	116,61	42,55
PPDS 5%	0,63	0,87	1

RDT: Rendement en grain, BIO : Biomasse aérienne, IR : Indice de récolte. Les moyennes suivies par la ou les même(s) lettre (s) ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Maazouz (2006), mentionne que lorsque le milieu permet l'expression du potentiel génétique de l'ensemble des variables morphologiques, la compensation est de type négatif. Les différences génotypiques de rendement sont dues à des différences exprimées chez un nombre réduit de variables liées, en relation avec le rendement. Par contre, lorsque le milieu limite l'expression d'un grand nombre de variables morphologiques, les différences de rendement entre génotypes émergent suite à la contribution concomitante de plusieurs variables.

La comparaison des moyennes de l'effet génotype du rendement en grain, par le test PPDS à 5%, illustre l'existence de six groupes homogènes. C'est plutôt les variétés sélectionnées localement qui sont les plus productives, en l'occurrence Hoggar (46,5 qx/ha) et Waha (44,23 qx/ha). Les variétés introduites ont une productivité acceptable avec 39,7 qx/ha pour Mexicali75 ; néanmoins, les plus faibles rendements ont caractérisé nos variétés locales surtout Polonicum avec seulement 37,37 qx/ha (Figure 17).

Semchedine (2015), signale que chaque génotype est caractérisé par une meilleure performance pour une des composantes du rendement. Les meilleurs génotypes en termes de rendement, en grains sont : Bousselem, Mexicali et Dukem, qui présentent une similitude en valeur pour le peuplement d'épi. Ainsi, Bousselem se caractérise par un PMG élevé, une faible fertilité de l'épi et un faible nombre de grain par unité de surface. Mexicali est caractérisé par un PMG élevé et un nombre de grains/épi nombre et de grains/m² moyens comparé à Dukem, qui a un faible PMG mais un nombre élevé de grains/épi et de grains/m².

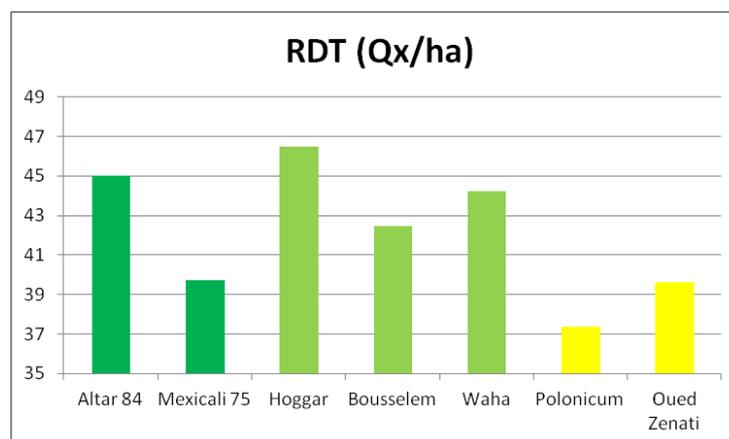


Figure 17 : Histogramme de la moyenne du rendement en grain des variétés étudiées.

Dans notre étude, le rendement en grain est corrélé d'une manière significative et positive avec le nombre de grains m^{-2} ($r= 0,83$) et à l'indice de récolte ($r =0,86$) (Figure 15 A). Des résultats similaires ont été attestés dans les travaux de Bahlouli (2006), où l'examen des coefficients de corrélation indique que le rendement en grain au cours des six années est positivement lié au nombre de grains m^{-2} ($r =0,923$, $n =60$), au nombre de grains $épi^{-1}$ ($r = 0,831$) et à l'indice de récolte ($r =0,844$).

Etudiant les changements intervenus dans l'architecture de la plante des nouvelles sélections réalisées depuis plusieurs décennies, Slafer et Andrade (1991) notent que l'amélioration du rendement se fait suite à celui de l'indice de récolte, avec peu de changements de la biomasse produite. L'amélioration du rendement s'est faite par augmentation du nombre de grains produits par unité, de surface semée plus que par l'augmentation du poids individuel du grain.

2-5- LA BIOMASSE AERIENNE (BIO)

La biomasse aérienne accumulée au stade épisaison est la résultante de la contribution de plusieurs caractères comme 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 de sol.

L'analyse de variance de la biomasse aérienne montre qu'au seuil de 0,1%, il y a une différence très significative pour les trois effets : année, géotypes et leur interaction. Le coefficient de variation est de 1,02 (Tableau 13).

Selon la figure 18, qui représente l'évolution de la biomasse aérienne au cours de nos cinq campagnes d'expérimentation, on constate que les deux saisons extrêmes sont la deuxième (2011-2012) et la quatrième avec des valeurs respectives de 75,8 et 149,25 qx/ha. Les trois autres campagnes ont des valeurs moyennes de biomasse aérienne intermédiaires, allant de 112,11 qx/ha pour la première saison, jusqu'à 122,27 qx/ha pour la cinquième saison.

Selon Richards *et al.* (1997), une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique *et al.* (1989) mentionne qu'un long cycle de développement est plus favorable à la production d'une biomasse aérienne élevée.

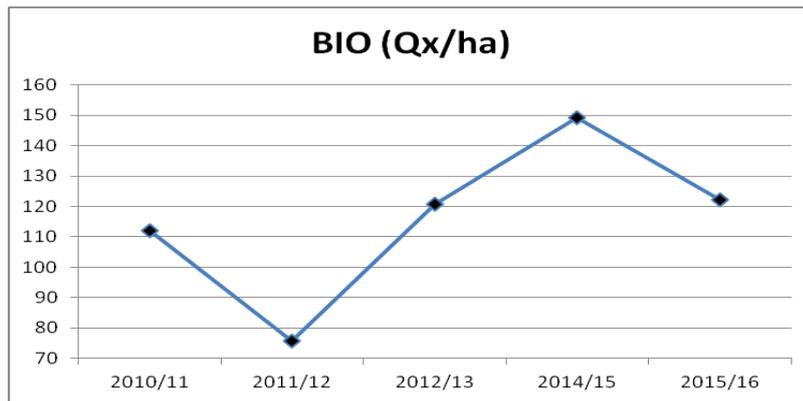


Figure 18 : Evolution de la biomasse aérienne durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).

Grace à la comparaison des moyennes par le test PPDS à 5%, on remarque que le comportement de nos génotypes vis-à-vis la biomasse aérienne au cours de notre expérimentation est différent (six groupes homogènes). Les variétés locales ont accumulé le plus de biomasse avec des valeurs de 128,8 et 127,9 qx/ha pour Oued Zenati et Polonicum respectivement. Les variétés introduites accumulent acceptablement la biomasse aérienne avec 115,2 qx/ha pour Altar84 et 114,2 qx/ha pour Mexicali75. Les plus faibles valeurs de biomasse sont enregistrées chez les variétés sélectionnées localement où Bousselem et Waha ne cumulent que 108,6 et 106,4 qx/ha respectivement (Figure 19).

Hanson *et al.* (1985) font remarquer que l'augmentation de la biomasse aérienne au stade épiaison peut venir d'une haute paille, comme c'est le cas des variétés anciennes. La hauteur associée à une meilleure répartition de la matière sèche produite conduit le plus souvent à l'amélioration du nombre de grains produits/m² et du rendement.

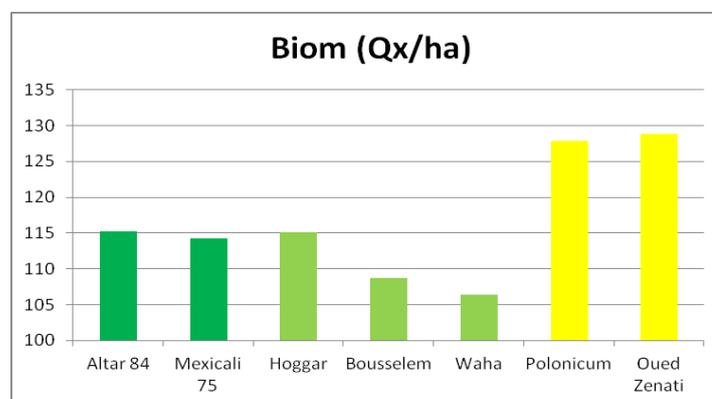


Figure 19 : Histogramme de la moyenne de la biomasse aérienne des variétés étudiées.

Dans notre étude, la biomasse aérienne n'a pas révélé de relation significative avec les autres variables globalement. Durant la première campagne (2010-2011), la biomasse est liée négativement avec le nombre d'épis/m² ($r = -0,79$) et l'indice de récolte ($r = -0,89$). Elle est positivement corrélée avec le poids de mille grains ($r = 0,79$) dans la deuxième campagne (2011-2012), et négativement corrélée avec l'indice de récolte ($r = -0,79$) à la troisième campagne (2012-2013) (Tableau 15).

Tableau 15: Coefficient de corrélation entre la biomasse et les caractères mesurés

	NE/m ²	NG/m ²	PMG	RDT	IR
2010/11	-0,79*	-0,64	0,32	-0,71	-0,89*
2011/12	-0,21	-0,61	0,79*	-0,14	-0,54
2012/13	-0,21	-0,07	0,61	0,71	-0,79*
2014/15	0,32	0,14	0,50	0,64	0,39
2015/16	-0,21	-0,21	-0,16	-0,36	-0,05
Global	-0,64	-0,64	0,71	-0,43	-0,43

NE/m²: Nombre d'Epis/m², NG/m²: Nombre de Grains/m², PMG: Poids de mille grains, RDT: Rendement en grains, IR : indice de récolte. * Significatif au seuil de 5%.

Selon (Maazouz, 2006), la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison, partie intégrante dans la formation des deux composantes du nombre de grains /m² qui sont les épis / m² et les grains par épi, 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. 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.

Chez les céréales à petit grain, la biomasse où la surface foliaire aux stades précoces du développement a été positivement corrélée au rendement grain sous des environnements de type Méditerranéen, en raison de la réduction des pertes d'eau du sol par évaporation d'une part et l'accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'eau , d'autre part (La relation entre le rendement et l'eau disponible pour la culture à travers les précipitations et /ou l'irrigation), quand la croissance se déroule dans la saison froide (López-Castañeda et Richards, 1994; Hafid *et al.*, 1998).

2-6- L'INDICE DE RECOLTE (IR)

L'indice de récolte est une mesure de la capacité d'une plante à accumuler les assimilats dans les organes d'une manière économique (Donald, 1968). Il s'agit du rapport entre le rendement et la biomasse, il est possible de l'améliorer soit par l'augmentation du poids des grains ou avec l'augmentation du nombre de grains par épi (Passioura, 1977). Siddique *et al.*, (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.

Le test ANOVA montre que les effets campagne, génotypes et l'interaction campagne X génotype sont différents significativement au seuil de 0,1% pour la variable indice de récolte, avec un coefficient de variation égale à 3,21% (Tableau 13).

La moyenne générale de l'indice de récolte, concernant l'effet campagne, est de 42,51% ; la PPDS est de 0,84 % constituant quatre groupes homogènes (Tableau 14). L'étude de l'évolution de la moyenne annuelle de l'indice de récolte au cours de nos cinq campagnes (2010-2016) révèle une nette régression au cours des années. C'est la première campagne (2010-2011) qui a donné le meilleur rapport avec 51,81%. En revanche, chez les quatre autres campagnes, l'indice de récolte est faible avec des valeurs assez proches, allant de 41,58% (2011-2012) à 39,06% pour la campagne 2015-2016 (Figure 20).

Bahlouli (2006), souligne que les génotypes productifs ($b > 1$) présentent des variances intersaisons élevées pour le rendement, le nombre de grains par épi et pour l'indice de récolte. Un génotype stable ($b = 1$) présente une variance intersaison de valeur intermédiaire (b est le coefficient de régression Finlay & Wilkinson, 1963).

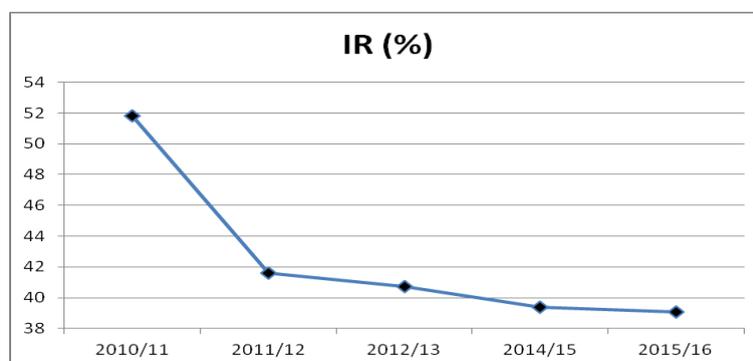


Figure 20 : Evolution de l'indice de récolte durant les cinq campagnes d'étude (2010-2016).

Avec une PPDS à 5% égale à 1, la comparaison des moyennes distingue sept groupes homogènes. L'analyse de la moyenne génotypique de l'indice de récolte au cours de notre étude, indique que les variétés sélectionnées localement et les variétés introduites donnent, toutes les deux, de bonnes valeurs avec, par exemple, 48,84% pour Hoggar et 47,84% pour Altar84. Néanmoins, les variétés locales enregistrent des faibles indices de récolte avec des valeurs voisines, 33,94% pour Polonicum et 32,9% pour la variété Oued Zenati (Figure 21).

Rouabhi (2008), atteste que l'ensemble des variétés précoces a enregistré un indice de récolte (*Harvest Index*) supérieur à celui des variétés locales allant dans le même sens que les travaux de Merah *et al.*, (2001) dans une étude de comparaison des performances de variétés locales et améliorées.

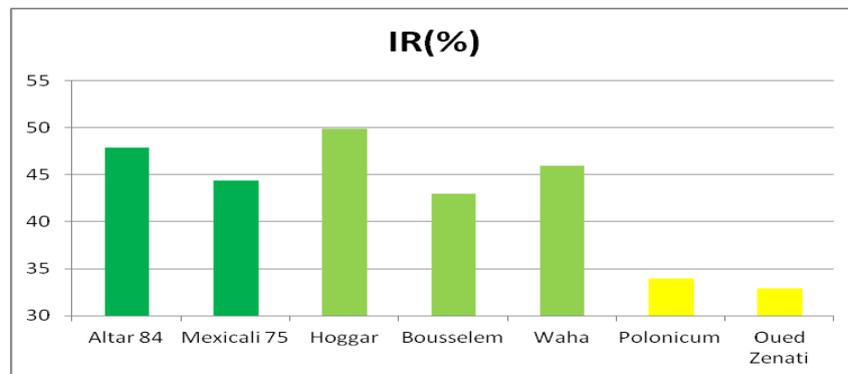


Figure 21 : Histogramme de la moyenne de l'indice de récolte des variétés étudiées.

D'après le tableau 16, on constate que durant nos cinq campagnes d'expérimentation, l'indice de récolte présente des relations avec l'ensemble des variables étudiées, mais globalement, il est positivement corrélé et d'une manière significative avec le nombre de grains/m² ($r = 0,96$) et surtout avec le rendement en grain ($r = 0,86$). Ceci va dans le même sens que les résultats de Semcheddine (2008) et Rouabhi (2008), qui tout les deux, notent que le rendement est très fortement corrélé à l'indice de récolte avec respectivement ($r = 0,72$) et ($r = 0,967$).

Dans cette perspective, le rendement grain peut être exprimé comme étant le résultat de trois processus physiologiques : les radiations interceptées par les organes photosynthétiques, la conversion des radiations interceptées en matière sèche et la répartition de cette matière sèche sous forme d'un indice de récolte (*Harvest Index*) (Hay et Walker, 1989).

Tableau 16: Coefficient de corrélation entre l'indice de récolte et les caractères mesurés

	NE/m ²	NG/m ²	PMG	RDT	BIO
2010/11	0,79*	0,86*	-0,54	0,89*	-0,89*
2011/12	0,21	0,29	-0,79*	0,07	-0,54
2012/13	0,25	0,64	-0,86*	-0,18	-0,79*
2014/15	-0,21	0,64	-0,11	0,93*	0,39
2015/16	-0,63	-0,29	0,31	0,11	-0,05
Global	0,71	0,96*	-0,68	0,86*	-0,43

NE/m²: Nombre d'Epis/m², NG/m²: Nombre de Grains/m², PMG: Poids de mille grains, RDT: Rendement en grains, BIO : Biomasse aérienne. * Significatif au seuil de 5%.

2-7- CARACTERISATION DES CAMPAGNES ET TYPOLOGIE VARIETALE

Comme la sélection sur la base d'un seul caractère induit à une variation pour les autres caractères mesurés, il est intéressant de rassembler les génotypes évalués sur la base des caractéristiques mesurées. La classification hiérarchique ou « cluster analysis » est une variété de techniques d'analyses statistiques multi variées qui permet le regroupement des objets dans des groupes homogènes, sur la base de leur similarité (Vachon *et al.*, 2005).

En effet, la classification hiérarchique sur la base des six variables mesurées montre d'une part, que nos cinq campagnes d'expérimentation se répartissent sur trois groupes distincts (Figure 22), alors que nos sept génotypes évalués ne se distribuent que sur deux groupes singuliers d'autre part (Figure 24). Les caractéristiques de chaque groupe sont données en tableau 17.

Tableau17: Valeurs caractéristiques des groupes identifiés sur la base des variables mesurées.

<i>Campagne</i>						
Groupe	NE/m ²	NG/m ²	PMG	RDT	BIO	IR
G1	111,74	3713,25	39,63	14,82	122,27	39,06
G2	460,725	13425,15	44,21	53,56	134,925	40,05
G3	256,025	10056,505	44,2	44,615	93,955	46,695
<i>Génotypes</i>						
G1	285,21	8090,83	46,13	38,49	128,36	33,42
G2	311,00	10540,97	43,42	43,58	111,92	46,21

NE/m²: Nombre d'Epis/m², NG/m²: Nombre de Grains/m², PMG: Poids de mille grains, RDT: Rendement en grains, BIO : Biomasse aérienne, IR : Indice de récolte.

Concernant la caractérisation des campagnes, le premier groupe (G1) concerne la cinquième année (2015 /16) uniquement. C'est un groupe à potentialités limitées où tous les caractères mesurés enregistrent des valeurs faibles, et cela est probablement dû à la déficience des précipitations (216,66 mm seulement). Le deuxième groupe (G2) est formé par les deux saisons (2012/13) et (2014/15). La majorité des variables mesurées présentent les meilleures valeurs ; donc, on peut le considérer comme un groupe à hautes potentialités. Les deux premières campagnes (2010/11) et (2011/12) constituent le troisième groupe (G3), à moyennes potentialités, avec des variables de valeurs intermédiaires (Figure 22).

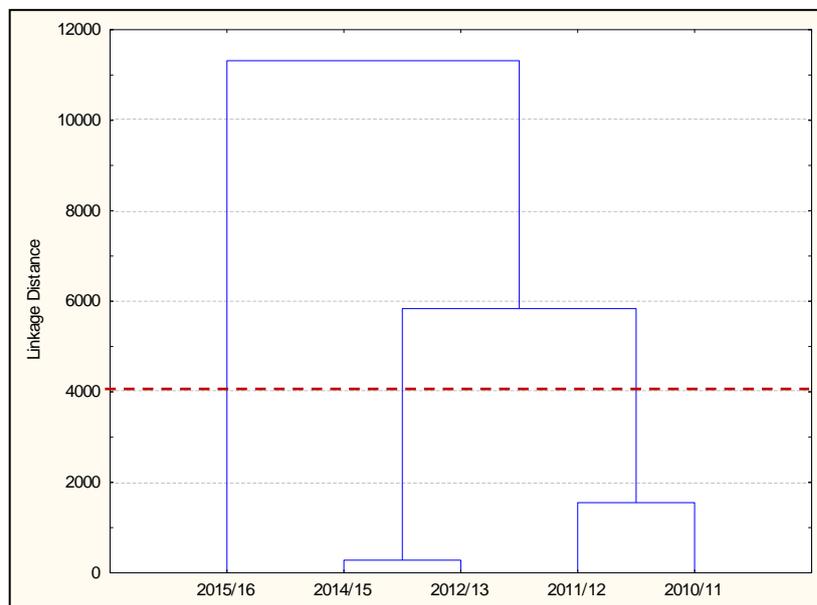


Figure 22 : Classification hiérarchique des campagnes étudiées sur la base des variables mesurées.

Les trois groupes de campagnes ainsi obtenus (G1, G2 et G3) diffèrent essentiellement pour le nombre de d'épis/m², le nombre de grains/m² et le rendement. Cependant, ils convergent pour le poids de mille grains et l'indice de récolte (Tableau 17, Figure 23).

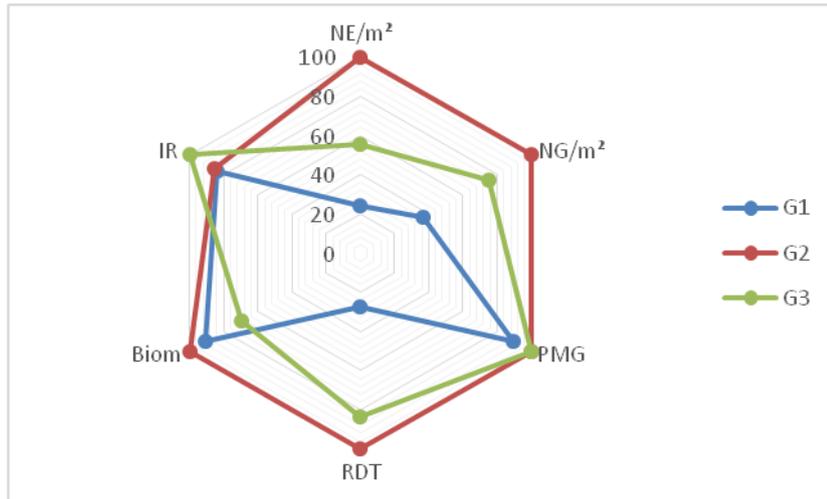


Figure 23 : Valeurs relatives moyennes (% valeur maxi) des variables mesurées chez les trois groupes de campagnes.

Pour la typologie variétale, les deux variétés Oued Zenati et Polonicum constituent le premier groupe (G1), celui des variétés locales. Le deuxième groupe (G2) est formé par les génotypes sélectionnés localement (Bousselem, Waha et Hoggar) et par les génotypes introduits (Mexicali75 et Altar84). On peut le considérer, dans ce cas, comme un groupe des variétés améliorées (Figure 24).

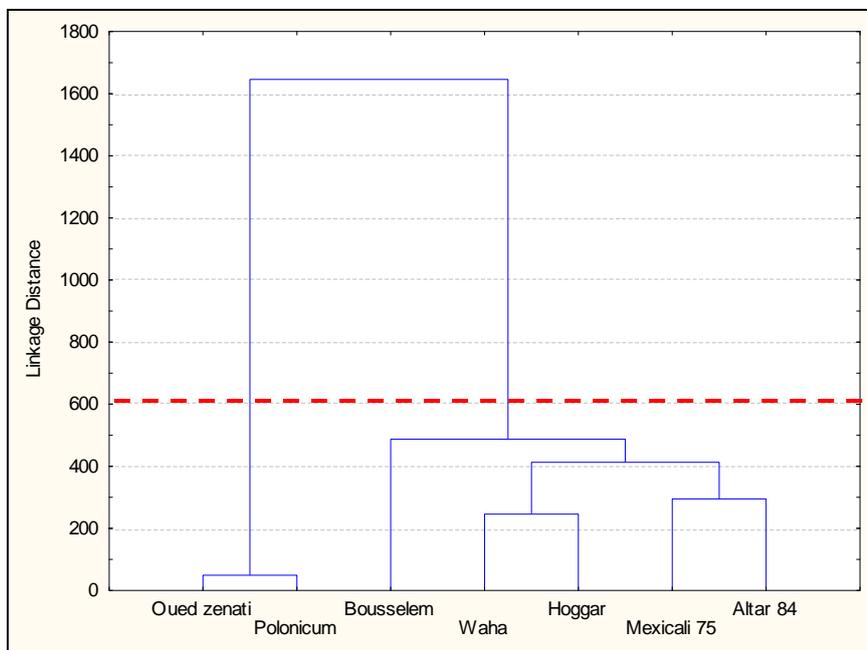


Figure 24 : Classification hiérarchique des génotypes évalués sur la base des variables mesurées.

Il apparaît clairement que les groupes des variétés obtenus G1 et G2, diffèrent principalement par le nombre de grains/m² et par l'indice de récolte. Toutefois, peu de différences apparaissent, en moyenne, entre les deux groupes pour le nombre d'épis/m², pour le poids de mille grain, et pour le rendement en grains et la biomasse aérienne (Tableau 17, Figure 25).

De ce fait, le premier groupe (G1) des variétés locales est caractérisé par un poids de mille grains et une biomasse aérienne de valeur supérieure. Cependant, le groupe des variétés améliorées (G2) se distingue par ces bonnes valeurs de tallage épis, de fertilité, de productivité et de l'indice de récolte.

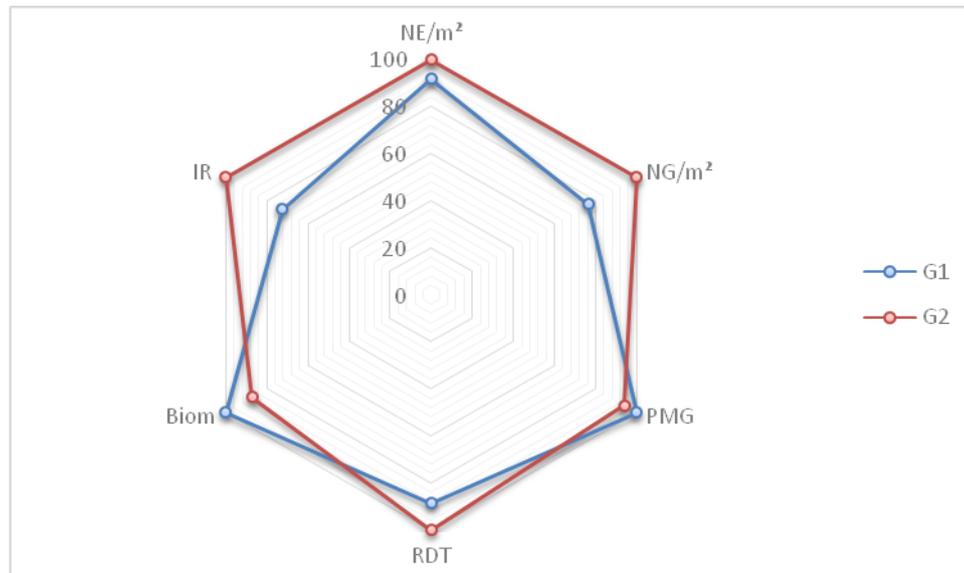


Figure 25 : Valeurs relatives moyennes (% valeur maxi) des variables mesurées chez les deux groupes de géotypes.

3-QUANTIFICATION DU STRESS HYDRIQUE

Le stress hydrique constitue un des paramètres les plus importants qui déterminent le rendement dans les régions méditerranéennes. Ces dernières 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)

Il est à signaler que le stade de développement et la durée au cours de laquelle le stress survient, l'influence sur la production finale et les composantes du rendement est plus ou moins importante (Mogensen., 1991 ; N'diongo., 1993).

3-1- Stress hydrique au cours de la première phase (semis-tallage)

Cette phase correspond à la mise en place de la culture, durant laquelle le taux de la couverture végétale est très faible. Elle dure en moyenne 36,55 jours. La campagne 2015-2016 enregistre la durée la plus courte avec 27,75 jours. Néanmoins, les deux campagnes 2010-2011 et 2014-2015 s'étalent sur une plus longue durée avec 38,75 jours, enregistrant un écart important de 11 jours par rapport à la valeur minimale (Figure 26).

Concernant les génotypes, l'accomplissement de la phase semis-tallage dure 35 jours seulement, pour la variété améliorée Bousselem , et elle se prolonge jusqu'à 38,6 jours pour la variété Altar84 (Tableau 18).

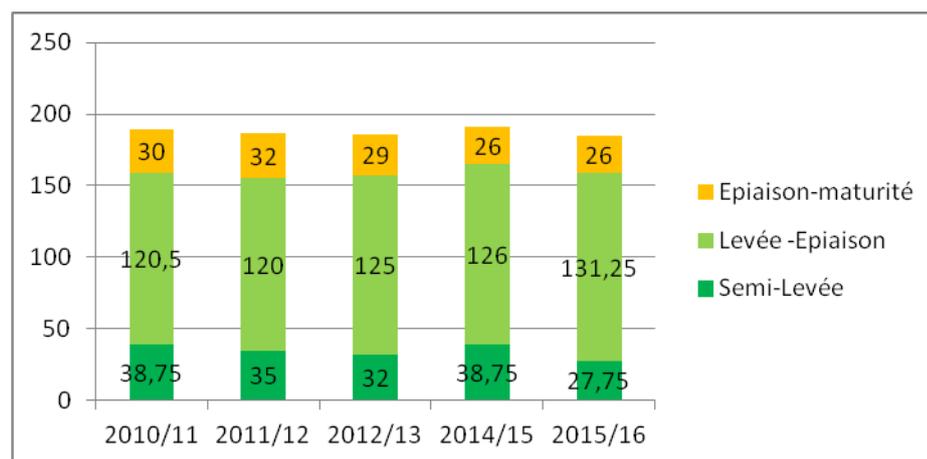


Figure 26: Durée des phases phénologiques durant les cinq campagnes d'étude.

L'évapotranspiration réelle (ETR) pour ce premier stade est relativement faible avec une moyenne de 28,14 mm, oscillant entre 13,65 mm, durant la saison culturale 2015-2016, et 36,65 mm pour la saison 2014-2015 (Figure 27).

Dans notre cas de figure, L'évapotranspiration réelle la plus faible est enregistrée chez les deux variétés Bousselem et Oued Zenati avec respectivement 26,61 et 26,85 mm. La valeur la plus élevée de l'évapotranspiration réelle est de 30,13 mm chez la variété Altar 84, dont la durée est la plus longue pour cette première phase phénologique (Tableau 18).

Tableau 18: Variation du stress hydrique durant la première phase (semis-tallage).

Campagne	Nombre Jours	ETP (mm)	ETR (mm)	Ks
2010/11	38,75	53,38	33,43	0,37
2011/12	35	46,7	25,8	0,45
2012/13	32	58,78	31,08	0,47
2014/15	38,75	47,75	36,73	0,23
2015/16	27,75	53,75	13,65	0,74
Génotype				
Oued Zenati	35,2	50,38	26,85	0,46
Bousselem	35	50,10	26,61	0,46
Altar 84	38,6	54,86	30,13	0,44
Mexicali 75	37,4	52,94	28,95	0,45
Moyenne	36,55	52,07	28,14	0,45

ETP : Evapotranspiration potentielle, ETR : Evapotranspiration réelle, Ks :coefficient de stress hydrique

La moyenne de l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETP) est de 52,07 mm. Elle varie de 46,7 mm, au cours de la deuxième campagne 2011-2012, à 58,78 mm, pour la troisième campagne 2012-2013. Comme pour l'ETR, C'est les deux variétés Bousselem et Oued Zenati qui ont le moins transpiré potentiellement avec 50,10 et 50,38 mm respectivement. En revanche, la variété Altar84, avec 54,86mm, représente la variété qui a le plus potentiellement transpiré (Figure 28).

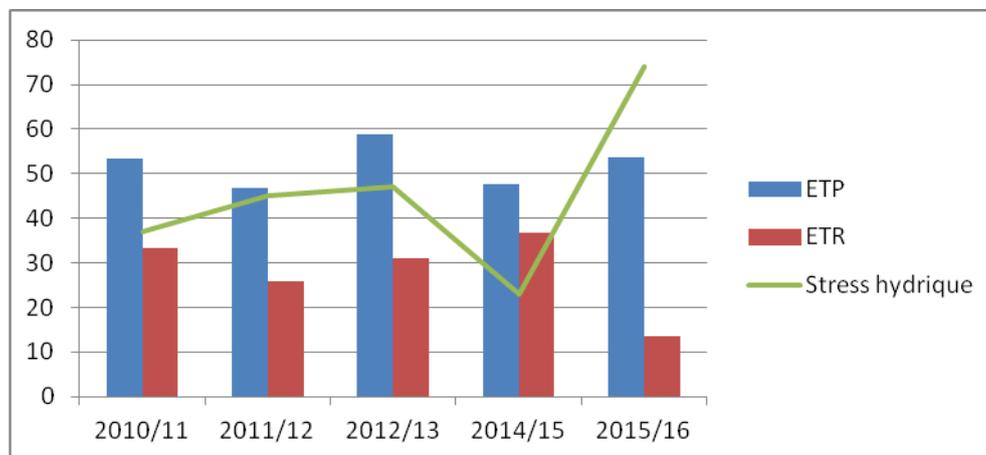


Figure 27: Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase semis-tallage entre les campagnes.

Dans notre expérimentation (2010-2016), les résultats de la simulation du bilan hydrique, de la première phase du cycle de croissance, indiquent un grand écart, entre évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle. Ceci engendre un coefficient de stress moyen de 0,45, qui varie de 0,23 à la quatrième saison de culture (2014/2015) à 0,74 lors de la cinquième saison de culture (2015/2016) (Figure 27).

Les génotypes les plus stressés sont Bousselem et Oued Zenati avec un coefficient de stress hydrique (K_s) est égale à 0,46 alors que, le génotype qui a subi moins de stress est Altar 84 ($K_s = 0,44$) (Tableau 18).

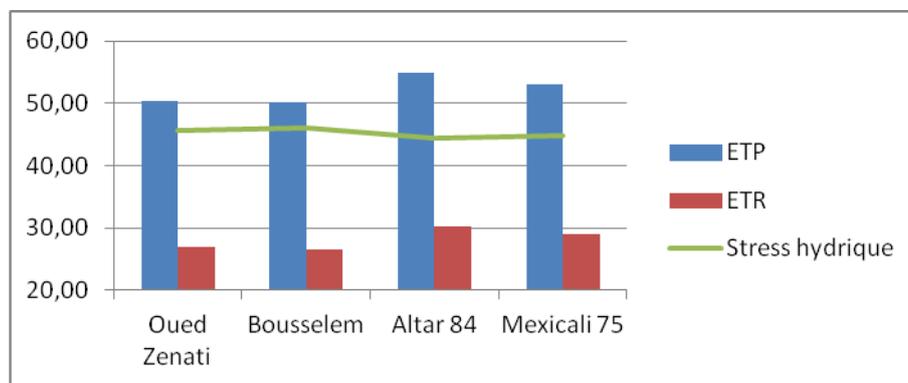


Figure 28: Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade semis-tallage.

Les figures 30, 31, 32 et 33 montrent le changement journalier de la pluviométrie et du stress hydrique durant tout le cycle de la culture. La pluviométrie a une influence claire sur le changement du niveau du stress hydrique. La baisse de la pluviométrie est la cause, ici, de l'augmentation du stress hydrique.

Concernant la première phase semis-levée, le coefficient de stress hydrique (K_s) est corrélé négativement et significativement avec la durée de cette phase que se soit entre génotypes ($r = -0,98$), ou entre campagnes ($r = -0,94$) (Figure 29).

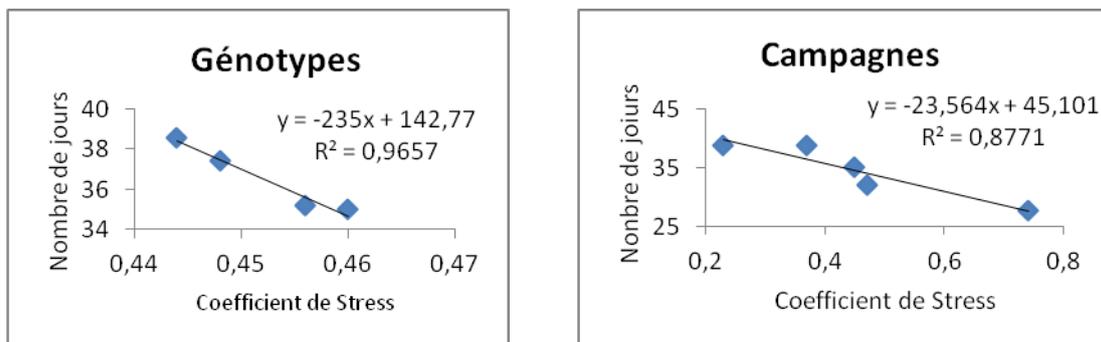


Figure 29 : Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase semis-levée

Il est indispensable de souligner, par ailleurs, que le développement foliaire est le stade le plus sensible au stress hydrique (Acevedo *et al.*, 1971) et la croissance des feuilles peut être considérablement réduite lorsque le potentiel hydrique des feuilles est compris entre -0,7 et -1,2 MPa (Eastham *et al.*, 1984).

Le tallage est très sensible au stress hydrique, il est presque réduit de moitié si les conditions sont suffisamment sèches (Peterson *et al.*, 1984; Rickman *et al.*, 1983). Par conséquent, le développement de l'indice de surface foliaire est le processus physiologique le plus affecté à ce stade.

Le déficit hydrique juste avant l'initiation florale peut également diminuer le nombre des ébauches d'épillets à ce stade (Oosterhuis et Cartwright, 1983). Le stress hydrique peut affecter la croissance du blé, mais les effets sont minimes lorsqu'il survient aux stades précoces plutôt qu'à la fin de la phase végétative et pendant le remplissage du grain (Abayomi et Wright, 1999).

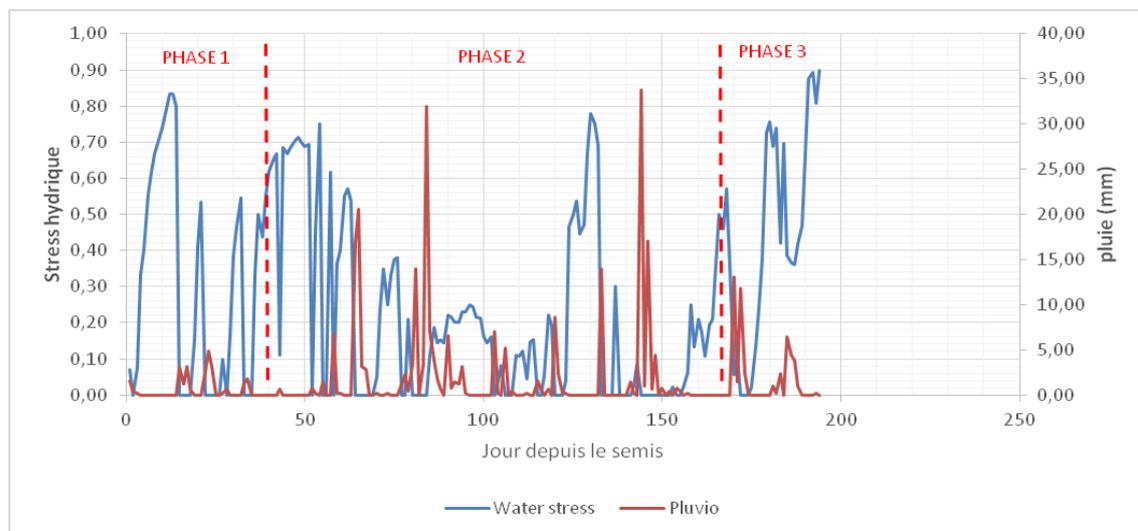


Figure 30 : Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2010-2011.

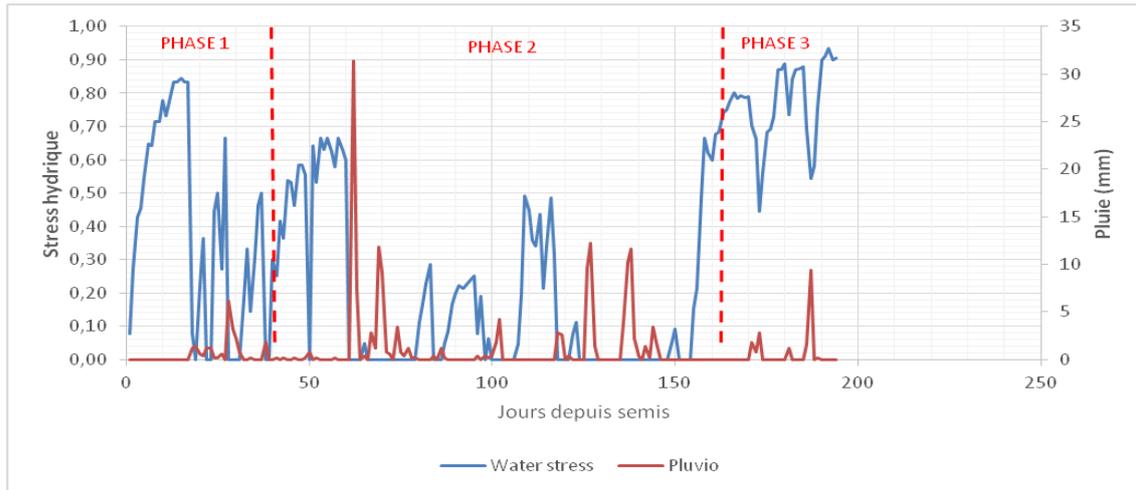


Figure 31 : Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2011-2012.

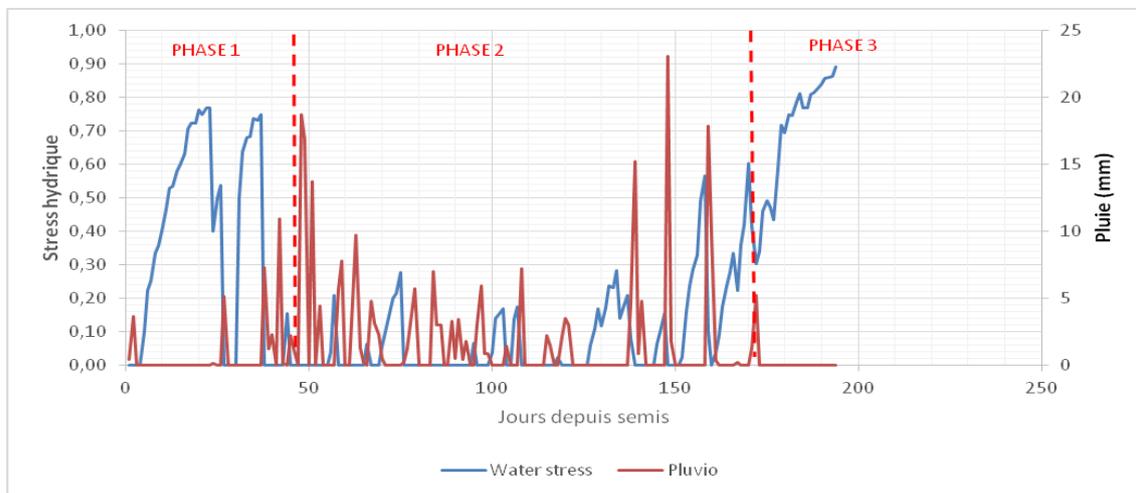


Figure 32 : Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2012-2013.

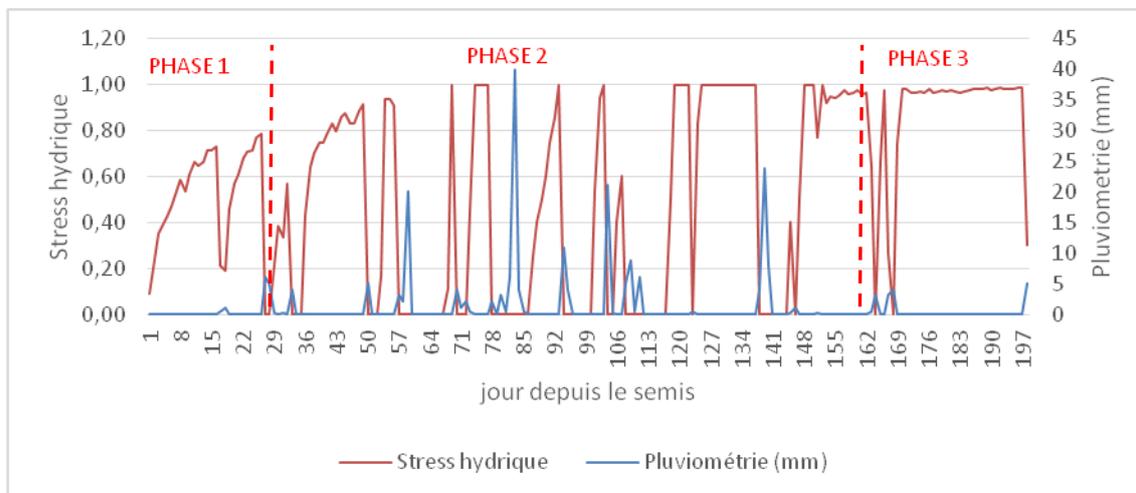


Figure 33 : Evolution de la pluviométrie et du stress hydrique durant la campagne 2015-2016.

3-2- Stress hydrique durant de la deuxième phase (tallage - épiaison)

Ce stade « tallage- épiaison » se caractérise par l'augmentation du taux de la couverture végétale du sol et par un développement considérable du système racinaire. Cette phase s'étale sur 123,75 jours en moyenne. Elle est observée sur une période allant de 120 à 131,23 jours, dont les campagnes 2011-2012 et 2010-2011 enregistrent la plus courte durée avec 120 et 120,5 jours. La plus longue durée est observée durant la campagne 2015-2016 avec 131,75 jours (Figure 26).

Les variétés les plus précoces sont Altar84 et Mexicali75 avec une durée de 119,6 et 121,8 jours respectivement. La variété locale Oued Zenati, qui présente une durée de 130,2 jours, est incontestablement, la plus tardive (Tableau 19).

En outre, la date d'épiaison, souvent utilisée comme un indicateur de précocité est considérée comme un important caractère qui influence les rendements des céréales, surtout en zones où la distribution de la pluviométrie est la variabilité des températures affectent la longueur du cycle de développement (Attia, 2007).

Tableau 19 : Variation du stress hydrique durant la deuxième phase (tallage - épiaison).

Campagne	Nombre Jours	ETP (mm)	ETR (mm)	Ks
2010/11	120,5	329,38	263,63	0,2
2011/12	120	318,2	261,8	0,17
2012/13	125	362,38	330,93	0,09
2014/15	126	300,33	258,85	0,13
2015/16	131,25	126,9	72,2	0,42
Génotype				
Oued Zenati	130,2	315,62	250,55	0,24
Bousselem	123,4	278,94	234,78	0,19
Altar 84	119,6	273,60	232,54	0,18
Mexicali 75	121,8	281,58	232,06	0,21
Moyenne	123,75	287,44	237,48	0,20

ETP : Evapotranspiration potentielle, ETR : Evapotranspiration réelle, Ks :coefficient de stress hydrique

Durant le deuxième stade de développement (tallage –épiaison), la moyenne générale de l'évapotranspiration potentielle est de 287,44 mm et celle de l'évapotranspiration réelle est de 237,48mm (Tableau 19). Ces deux paramètres ont de faibles valeurs au cours de la dernière saison agricole (2015-2016) avec 126,9 mm pour l'ETP et 72,2 mm pour l'ETR. L'évapotranspiration, durant la saison 2012-2013, est en effet, au maximum, d'où sa valeur potentielle est de 362,38 mm et sa valeur réelle est de 330,93mm. D'après la figure 34, on constate que les deux paramètres

ETP et ETR ont une évolution parallèle et les mêmes tendances concernant les valeurs maximales, intermédiaires ou minimales.

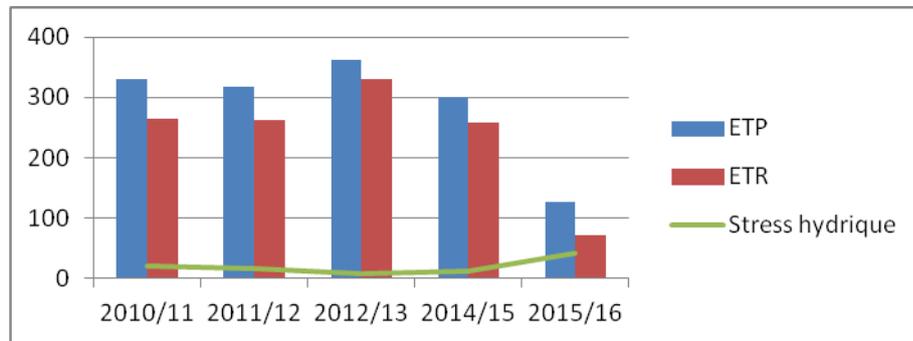


Figure 34: Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase tallage-épiaison entre les campagnes.

Les valeurs maximales de l'évaporation potentielle et réelle ont été enregistrées dans les parcelles d'Oued Zenati avec 315,62 mm et 250,55 respectivement. Alors que, les parcelles qui ont été moins exposées à l'évaporation sont celles d'Altar84, avec 273,60 mm pour l'ETP et 232,54 mm pour l'ETR (Figure 35).

Malgré la longueur de la durée et l'importance de l'évapotranspiration du stade tallage-épiaison comparativement au premier stade semis-levée, le coefficient de stress hydrique, de la deuxième phase, a une faible valeur moyenne ($k_s = 0,20$). Cette moyenne varie entre une valeur minimale de 0,09 pour la campagne 2012-2013, et une valeur maximale de 0,42 pour la campagne 2015-2016 (Tableau 19).

Altar84 se caractérise par le plus faible coefficient de stress hydrique ($K_s = 0,18$), qui est la conséquence d'une faible transpiration potentielle et réelle. En parallèle, Oued Zenati détient le coefficient de stress hydrique le plus élevé ($K_s = 0,24$). De ce fait, il représente le génotype le plus stressé (Figure 35).

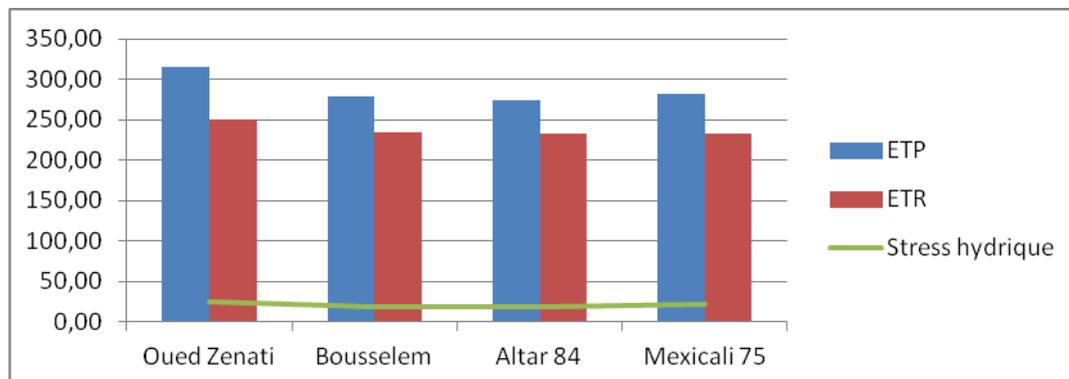


Figure 35: Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade tallage-épiaison.

A ce stade de croissance, levée-épiaison, la relation entre le coefficient de stress hydrique (K_s) et le nombre de jours est de type positif et significatif pour l'effet géotypes ($r=0,89$), et elle est seulement positive pour l'effet campagnes ($r=0,62$) (Figure 36).

Semcheddine (2008), confirme que les géotypes les plus précoces à l'épiaison sont les moins stressés. Il atteste que les dates de 50% et 100% à l'épiaison sont très significativement corrélées au stress hydrique du stade épiaison, soit un coefficient de corrélation $r = -0,94$ et $-0,93$ respectivement.

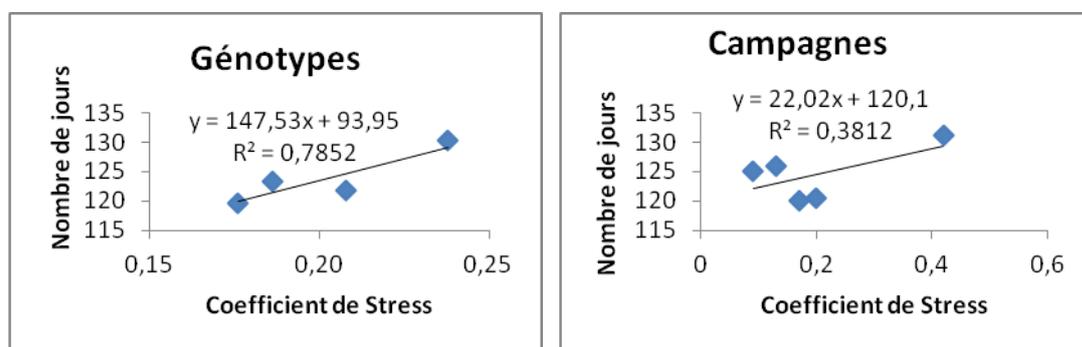


Figure 36 : Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase tallage-épiaison

Cette étape est donc une période de croissance très active des plantes. Le stress hydrique durant cette phase diminue le nombre des épillets par épi de talles fertiles (Hochman, 1982; Moustafa *et al.*, 1996) et provoque la mort des fleurons distaux et basaux des épis (Oosterhuis et Cartwright, 1983). Il s'ensuit que des déficits hydriques légers à modérés au cours de cette période réduiront la croissance cellulaire et la surface foliaire, entraînant une diminution de la photosynthèse par unité de surface en raison de la fermeture partielle des stomates (Acevedo, 1991).

La période végétative correspond à la formation des tissus nouveaux de l'épi, à la différenciation des épillets, à l'organisation des ébauches florales et la fécondation. Une sécheresse pendant cette période, induit l'avortement d'un nombre plus ou moins grand d'épillets à la base et à l'extrémité de l'épi. Ce qui donne des épis de petites tailles et ayant un poids faible (Ben Naceur *et al.*, 1999).

Il semble donc, que les génotypes modernes qui sont plus précoces esquivent le stress de fin du cycle. La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive des 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 aléatoire des précipitations (Makhlouf *et al.*, 2006). Fisher et Maurer (1978) notent que chaque jour de gagner en précocité génère un gain en rendement de 30 à 85 kg/ha.

3-3- Stress hydrique au cours de la troisième phase (épiaison-Maturité)

Ce dernier stade de développement, qui va de l'épiaison jusqu'à la maturation du grain, dure en moyenne 31 jours. C'est les deux dernières campagnes 2014-2015 et 2015-2016 qui sont les plus courtes avec un nombre de jours égal à 26. En revanche, la campagne 2011-2012 est la plus longue avec une durée de 32 jours (Figure 26).

Sur le plan génotypique, la durée la plus courte est enregistrée chez Oued Zenati avec 29,8 jours. Cependant, les variétés Bousselem, Altar84 et Mexicali75 cumulent un plus grand nombre de jours avec la même valeur de 31,4 (Tableau 20). La différence entre génotypes, pour la durée de cette phase, n'est pas assez importante.

Tableau 20 : Variation du stress hydrique durant la troisième phase (épiaison-maturité).

Campagne	Nombre Jours	ETP (mm)	ETR (mm)	Ks
2010/11	30	170,13	99,80	0,41
2011/12	32	201,88	51,55	0,74
2012/13	29	171,78	77,98	0,54
2014/15	26	216,88	258,85	0,13
2015/16	26	193,25	5,21	0,97
Génotype				
Oued Zenati	29,8	187,66	51,94	0,72
Bousselem	31,4	196,78	66,00	0,65
Altar 84	31,4	198,06	64,41	0,66
Mexicali 75	31,4	180,62	65,03	0,63
Moyenne	31	190,78	61,85	0,66

ETP : Evapotranspiration potentielle, ETR : Evapotranspiration réelle, Ks : coefficient de stress hydrique

Il convient ici, de mentionner, qu'en zone méditerranéenne, la période de floraison optimale en condition pluviale, pour les blés se trouve bornée par les gelées précoces printanières d'une part et d'autre part par la sécheresse tardive et le stress thermique qui coïncide avec la phase de remplissage. La transition des variétés locales tardives vers les variétés modernes (précoces) grâce aux efforts d'amélioration, chez le blé dur a été caractérisée par une avancée dans la date de floraison (Blum *et al.*, 1989),

Dans notre contexte d'étude, le stade de croissance épiaison –maturité se caractérise par une forte ETP et une faible ETR. En effet, l'évapotranspiration réelle la plus faible est enregistrée chez la variété Oued Zenati avec 51,94 mm. La valeur la plus élevée de l'évapotranspiration réelle est de 66 mm chez la variété Bousselem, donnant une moyenne générale de 61,85 mm (Tableau 20).

La transpiration réelle maximale est de 258,85 mm, enregistrée au cours de la quatrième saison 2014-2015. Alors que, la transpiration réelle minimale, qui est de 5,21 mm, est signalée durant la dernière saison 2015-2016 (Figure 37).

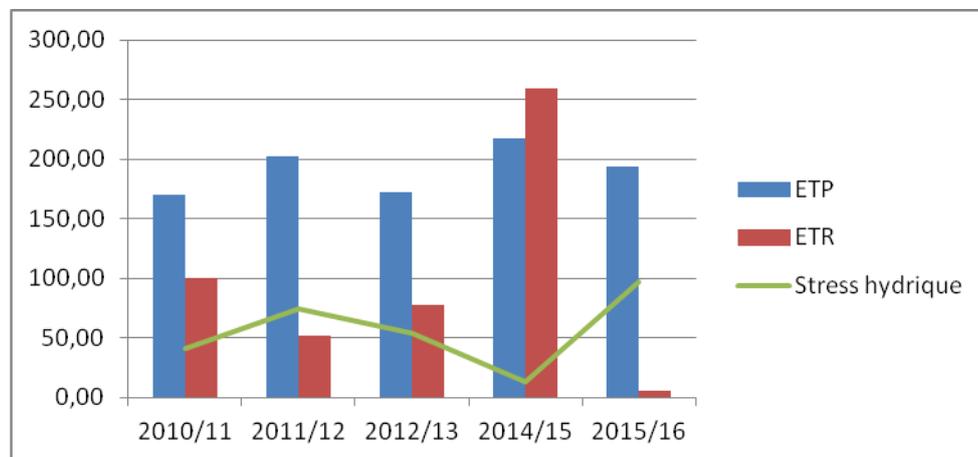


Figure 37: Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant la phase épiaison-maturité entre les campagnes.

En revanche, pour la transpiration potentielle, on note une variation entre les campagnes. La valeur moyenne de l'évapotranspiration potentielle est de 190,78 mm. Elle varie entre un maximum de 216,88 mm observé durant la campagne 2014-2015 et un minimum de 170,13 et 171,78 mm durant les campagnes 2010-2011 et 2012-2013 respectivement (Figure 37).

Les génotypes Altar 84 et Bousselem possèdent une forte transpiration potentielle, avec respectivement 198,06 et 196,78 mm ; alors que, le génotype Mexicali 75 a une transpiration potentielle faible de 180,62mm (Figure 38).

Au cours de notre étude (2010-2016), les résultats de la simulation du bilan hydrique, du stade épiaison-maturité, montrent un coefficient de stress moyen de 0,66, il varie de 0,13 à la quatrième saison de culture (2014/2015) à 0,97 lors de la cinquième saison de culture (2015/2016) (Figure 37).

Le génotype le plus stressé, est Oued Zenati avec un coefficient de stress hydrique (K_s) égale à 0,72 tandis que, le génotype qui a subi le moins de stress hydrique est Mexicali 75 ($K_s = 0,66$) (Figure 38).

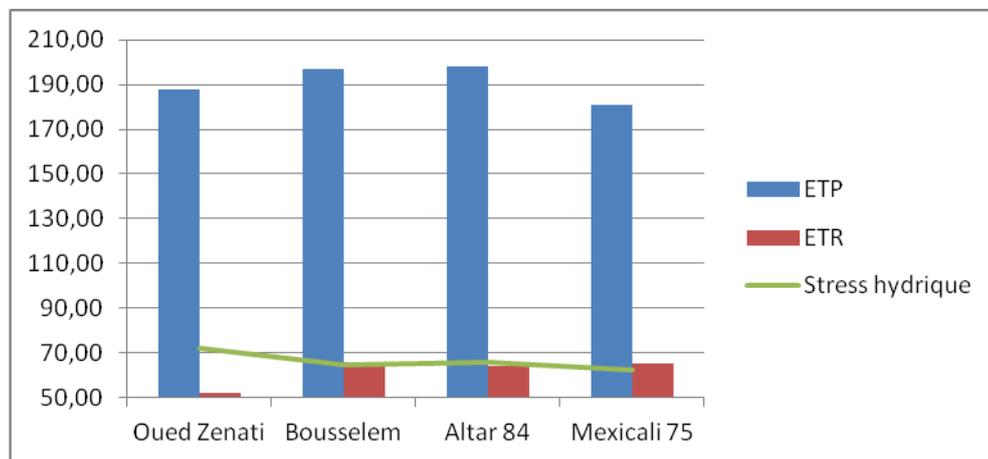


Figure 38: Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours du stade épiaison-maturité.

Durant la phase épiaison-maturité, la relation entre le coefficient de stress hydrique (K_s) et le nombre de jours est de type négative et significative pour l'effet génotypes ($r = -0,95$), et pour l'effet campagnes, on constate l'absence de relation avec un coefficient de corrélation $r = 0,13$, et un coefficient de détermination $R^2 = 0,01$ (Figure 39).

La réduction du nombre de grains est lié étroitement au stress hydrique intervenant durant la phase épiaison- floraison. Pendant cette phase le déficit entraîne un avortement des épillets et une stérilisation des fleurs, suivie d'une réduction de la viabilité du pollen et une diminution de la réceptivité des stigmates (Aspinal *et al.*, 1964). Fisher, (1973) note que la contrainte hydrique peut également conduire à une

réduction des rendements sans effets apparents sur la morphologie de l'épi par l'induction d'une stérilité male.

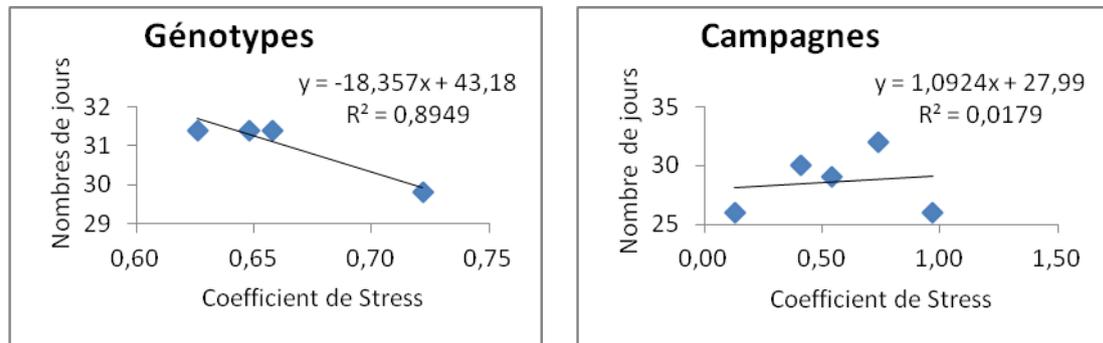


Figure 39 : Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant la phase épiaison-maturité

Aussi, la croissance des plantes de blé (racines, feuilles, tiges et épis) se poursuit environ 10 jours après l'anthèse. Le déficit hydrique près de l'anthèse accélère le développement (Simane *et al.*, 1993) ; l'accumulation des carbohydrates dans la tige, qui se produit entre l'anthèse et la phase linéaire de la croissance du grain, est diminuée (Nicholas et Turner, 1993).

La remobilisation des assimilats de la pré-anthèses dans le grain devient très importante puisque la photosynthèse est diminuée par le stress hydrique et les glucides non structurels totaux des feuilles et des tiges de blé (en particulier les fructanes et le saccharose) contribuent de manière significative au remplissage du grain (Bidinger *et al.*, 1977; Richards et Townley-Smith, 1987; Kiniry, 1993; Palta *et al.*, 1994).

Enfin, Il est à noter que le stress hydrique imposé au cours des derniers stades pourrait également entraîner une réduction du nombre d'épillets/ épis et de leur poids (Gupta *et al.*, 2001; Dencic *et al.*, 2000).

3-4- Stress hydrique durant le cycle cultural entier.

Dans notre expérimentation, la moyenne générale du nombre de jours de nos campagnes est 188,70 jours. Elle s'étale sur une période allant de 185 à 190,75 jours, dont les campagnes 2015-2016 et 2012-2013 enregistrent la plus courte durée avec 185 et 186 jours respectivement. La plus longue durée est observée durant la campagne 2014-2015 avec 190,75 jours (Figure 26).

Les variétés les plus précoces sont Altar84 et Bousselem avec une durée de 189,6 et 189,8 jours respectivement. La variété locale Oued Zenati, qui présente une durée de 195,2 jours, est la plus tardive (Tableau 21).

Tableau 21 : Variation du stress hydrique durant le cycle cultural entier.

Campagne	Nombre Jours	ETP (mm)	ETR (mm)	Ks
2010/11	189,25	184,30	132,29	0,33
2011/12	187,00	188,93	113,05	0,45
2012/13	186,00	197,65	146,66	0,37
2014/15	190,75	188,32	123,43	0,34
2015/16	185,00	124,63	30,35	0,71
Moyenne	188,70	176,76	109,16	0,44
Génotype				
Oued Zenati	195,20	184,55	109,78	0,47
Bousselem	189,80	175,27	109,13	0,43
Altar 84	189,60	175,51	109,03	0,43
Mexicali 75	190,60	171,71	108,68	0,43
Moyenne	191,30	176,76	109,16	0,44

ETP : Evapotranspiration potentielle, ETR : Evapotranspiration réelle, Ks : coefficient de stress hydrique

Dans le même contexte, le nombre de jours du cycle cultural intégral a montré aussi, des relations inverses et opposés entre l'effet génotype et l'effet campagnes. Dans ce dernier, la durée du cycle est corrélée significativement et négativement avec le stress hydrique d'une part ($r = -0,73$) et positivement avec le rendement ($r = 0,82$) d'autre part (Figure 40 et 41). Toutefois, le nombre de jours des génotypes est en relation très significative et positive avec le stress hydrique ($r = 0,98$), alors qu'il est négativement corrélé avec le rendement affichant un coefficient de corrélation $r = -0,66$ (Figure 40, 41).

Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Semcheddine (2015), qui mentionne que les génotypes les plus tolérants au stress hydrique sont ceux qui se caractérisent par un cycle végétatifs court, une épiaison précoce, une longue phase de floraison et de remplissage des grains et une maturité précoce. Maamri (2011) signale que les génotypes à cycle de croissance court et à épiaison précoce donnent des rendements plus élevés comparativement aux génotypes à cycle de croissance long et à épiaison tardive.

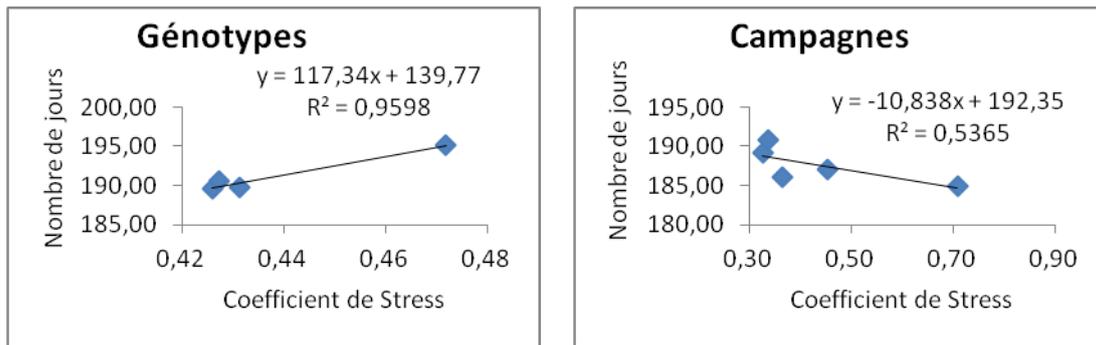


Figure 40: Relation entre le stress hydrique et le nombre de jours durant le cycle cultural entier.

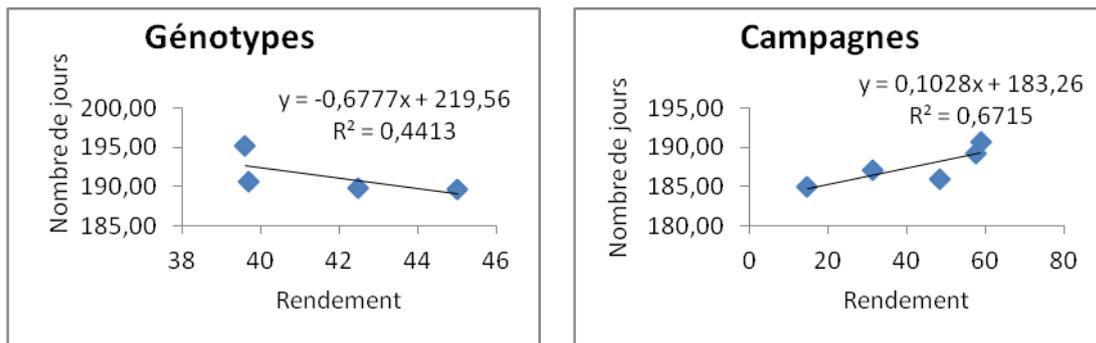


Figure 41 : Relation entre le rendement et le nombre de jours durant le cycle cultural entier.

En ce qui concerne l'effet campagne, à l'échelle du cycle de croissance complet, l'essai de 2012-2013 est potentiellement et réellement celui qui transpire le plus. Il détient ainsi, une évapotranspiration potentielle de 197,65 mm et une évapotranspiration réelle de 146,66 mm. A l'opposé, la dernière campagne 2015-2016 possède la plus faible évapotranspiration potentielle (124,63 mm) et réelle (30,35 mm). La simulation montre que le coefficient de stress hydrique affiche une moyenne entre les campagnes de 0,44. Cette moyenne varie entre les campagnes ayant un Ks de 0,33 (2010-2011) et un Ks de 0,71 (2015-2016) (Figure 42).

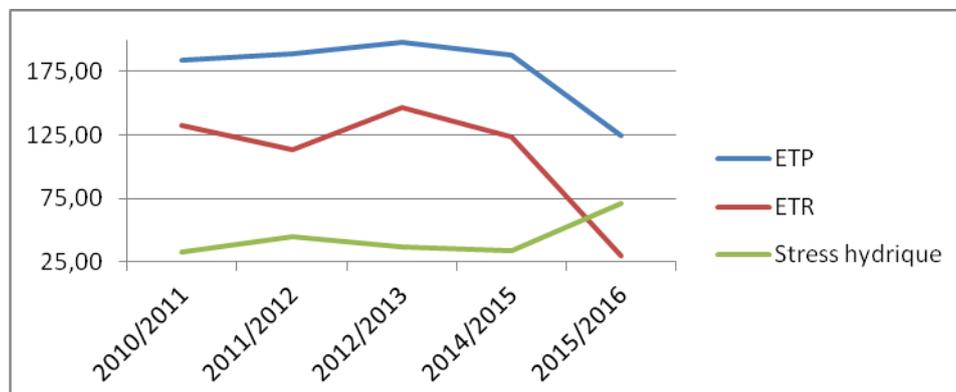


Figure 42: Variation de la moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle durant le cycle cultural entier entre les campagnes.

En effet, à l'échelle du cycle cultural, les résultats obtenus indiquent une différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle des génotypes cultivés. La transpiration potentielle moyenne, de l'ensemble des génotypes est de 176,76 mm, alors que leurs transpiration réelle est de 109,16 mm. Ceci engendre un coefficient de stress moyen de 0,44. Potentiellement, Oued Zenati transpire plus, avec 184,55 mm. Alors que, réellement il ne transpire que 109,78 mm. Par conséquent, c'est le génotype le plus stressé. Il enregistre un coefficient de stress (K_s) de 0,47. Mexicali 75 enregistre la plus faible transpiration potentielle, soit 171,71 mm, mais, ils se caractérise également, par une faible transpiration réelle soit 108,68 mm. De ce fait, il est parmi les génotypes les moins stressés. Son K_s est de 0,43 (Figure 43).

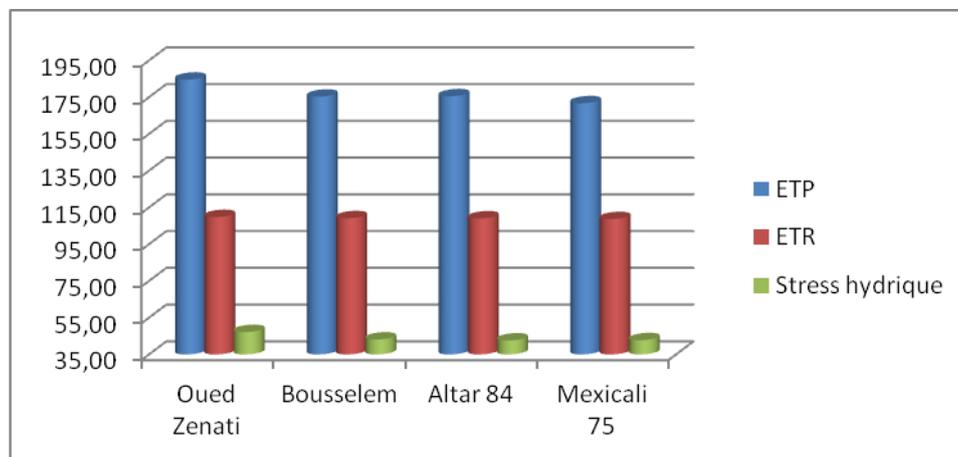


Figure 43: Moyenne du stress hydrique et de la transpiration potentielle et réelle des génotypes au cours cycle cultural entier.

3-5- L'effet direct du stress hydrique sur le rendement et ses composantes.

Le bilan hydrique indique deux périodes de stress, la première a été observée avant la levée ($K_s= 0,45$) et ne semble pas avoir affectée la culture, que par le fait que les besoins en eau des génotypes durant cette phase sont faibles et ils dépendent plus sur leurs réserves internes (de la graine) que sur les apports externes (environnement de culture). En revanche, la deuxième période de stress ($K_s= 0,66$) a eu probablement, un effet contraignant sur la culture, étant donné qu'elle a coïncidé avec la phase épiaison-maturité, deux stades importants de la croissance et du développement de la végétation (Figure 44).

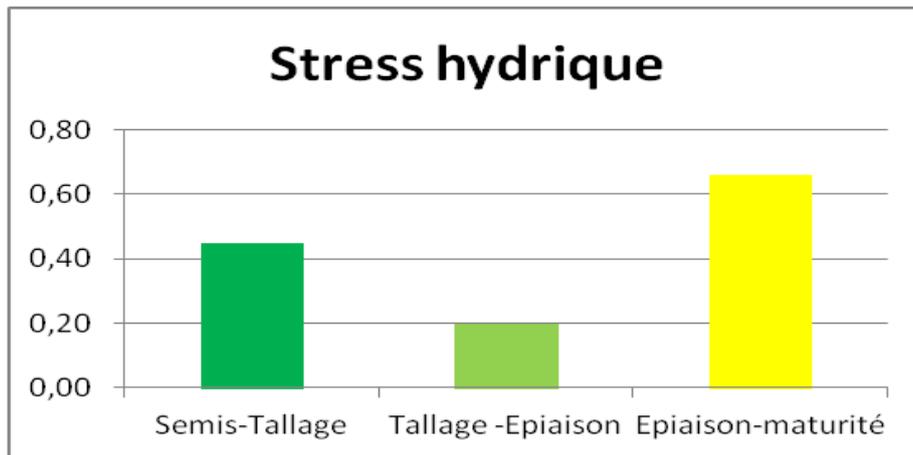


Figure 44: Moyenne du stress hydrique durant les trois phases de développement.

Comme le montre la figure 45, le stress hydrique affecte négativement le rendement en grains et le poids de mille grains, en particulier pendant la deuxième (2011-2012) et la cinquième saison de culture (2015-2016).

Globalement, durant nos cinq campagnes d'étude (2010-2016), le stress hydrique est corrélé significativement et d'une manière négative avec le rendement en grains ($r = -0,95$) (Figure 46 A), avec le nombre de grains par m^2 ($r = -0,94$) et avec le nombre d'épis par m^2 ($r = -0,78$). Des relations de corrélations négatives moyennes relient le stress hydrique avec le poids de mille grains et avec l'indice de récolte affichant des coefficients de corrélations respectives de $r = -0,55$ et $r = -0,46$ (Figure 46 B) ; cependant, la biomasse aérienne est faiblement et négativement corrélé au stress hydrique ($r = -0,13$).

Ashraf (1998) a signalé que le stress hydrique à l'anthèse réduit la pollinisation et qu'ainsi moins de grains sont formés par épi, ce qui entraîne une réduction du rendement en grains. Le stress hydrique est connu pour réduire la biomasse, la capacité de tallage, le nombre de grains par épi et la taille des à n'importe quelle étape, en raison de la réduction de l'efficacité d'utilisation des rayonnements. Ainsi, l'effet global du stress hydrique dépend de l'intensité et de la durée du stress (Bukhat, 2005).

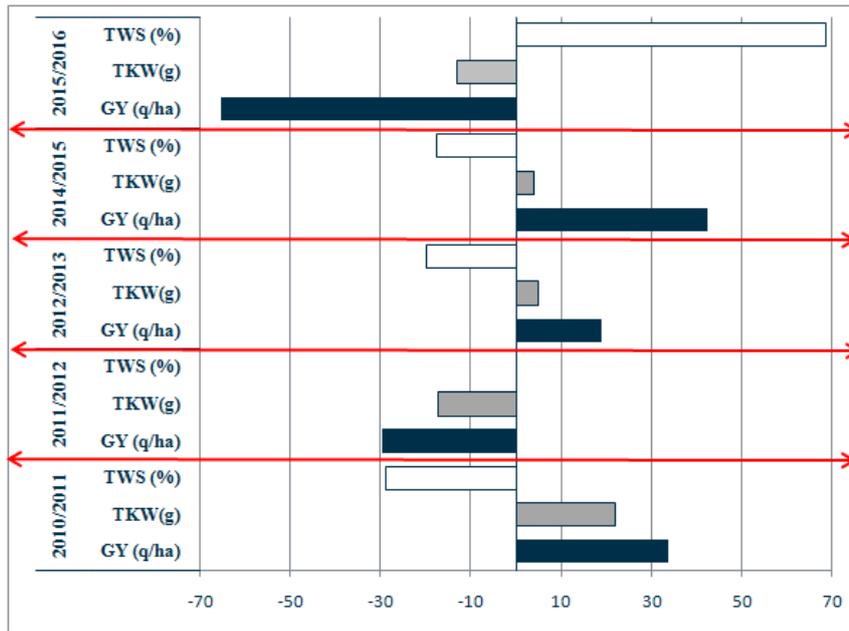


Figure 45 : Écart par rapport aux valeurs moyennes du rendement en grains (GY), du poids de mille grains (TKW) et du stress hydrique total (TWS) au cours de nos cinq saisons de culture (2010-2016).

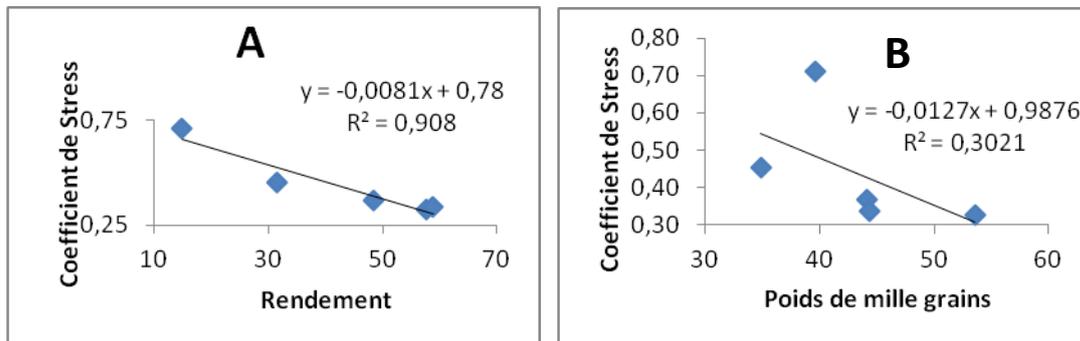


Figure 46 : Relation entre le coefficient de stress avec le rendement (A) et avec le poids de mille grains (B) durant les campagnes d'études.

Pour le génotype Altar84, le stress hydrique dévie (inférieur) de la moyenne avec 2,27 %, donc il y a un effet très positif sur le rendement (+ 7,95). Le même constat est observé sur le génotype Bousselem, avec davantage, un effet favorable pour le poids de milles grains aussi (+3,22).

Concernant la variété Mexicali 75, malgré la faible déviation du stress hydrique (2,27%), le rendement et surtout le poids de mille grains sont négativement affectés avec des écarts par rapport aux valeurs moyennes de -4,8 et -7,29 respectivement.

Chez la variété Oued Zenati, le stress hydrique enregistre une valeur 47% ; il est supérieur de la moyenne de 6,81. Ceci, a engendré un effet négatif sur le rendement (-5,01) et un effet positif sur le poids de mille grains (+ 5,08) (Figure 47).

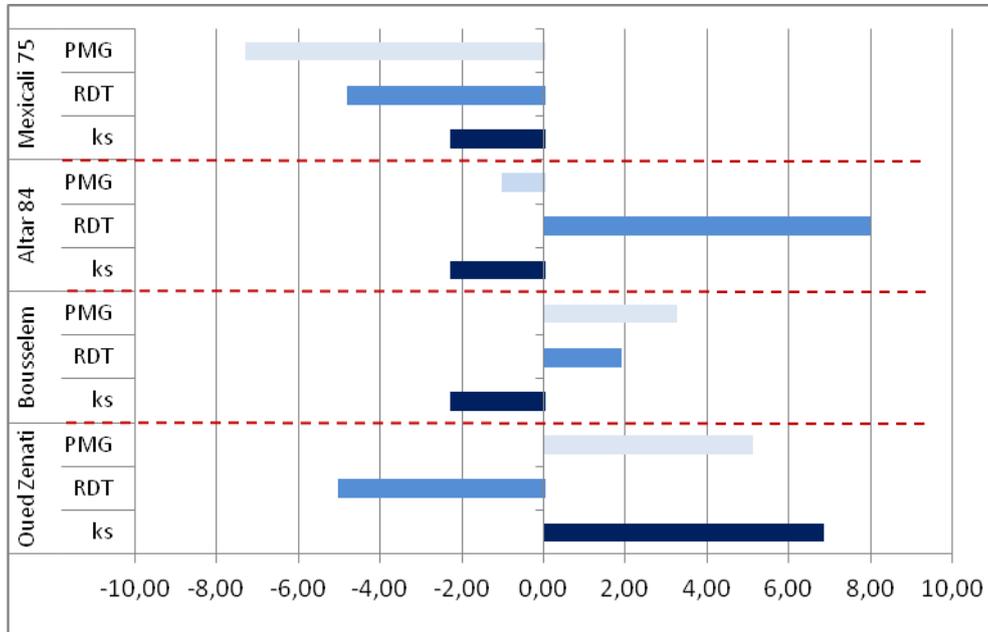


Figure 47: Écart par rapport aux valeurs moyennes du rendement en grains (RDT), du poids de mille grains (PMG) et du stress hydrique total (Ks) entre les génotypes.

L'étude des relations entre l'effet génotype et le stress hydrique donne plusieurs informations. D'abord, le stress hydrique est corrélé significativement et d'une manière négative avec le nombre de grains par m² ($r = -0,98$) et avec l'indice de récolte ($r = -0,97$). Aussi, des relations de corrélations négatives moyennes relient le stress hydrique avec le rendement en grains et avec le nombre d'épis par m² affichant des coefficients de corrélations respectives de $r = -0,56$ et $r = -0,66$ (Figure 48 A). Enfin, le poids de mille grains et la biomasse aérienne sont en relation positives avec le stress hydrique avec respectivement $r = 0,67$ et $r = 0,90$ (Figure 48 B).

Ces résultats confirment que les génotypes moins stressés tels que Bousselem, et Altar 84 donnent des rendements significativement élevés comparativement aux génotypes plus stressés à savoir Oued Zenati. Ces résultats corroborent ceux de Semcheddine (2015) et Rouabhi (2008) qui ont montré que les génotypes à cycle végétatif long subissent plus de stress que les génotypes précoces.

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)

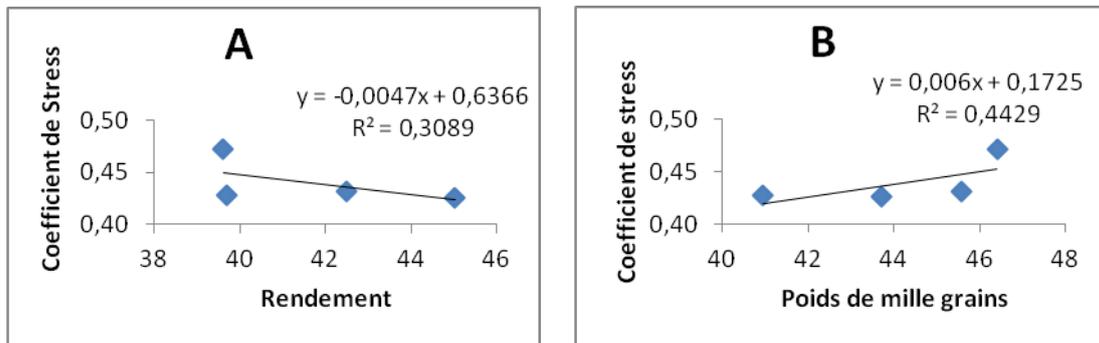


Figure 48 : Relation entre le coefficient de stress avec le rendement (A) et avec le poids de mille grains (B) entre les génotypes.

4- SIMULATION ET EVALUATION DU MODELE AQUA-CROP

4-1- RENDEMENT EN GRAINS (RDT)

La moyenne générale du rendement grain simulé est de 4,97 t/ha. Elle varie entre une valeur minimale de 1,68 t/ha enregistrée durant la campagne 2015-2016 et une valeur maximale de 6,78 t/ha au cours de la campagne 2010-2011 (Figure 49).

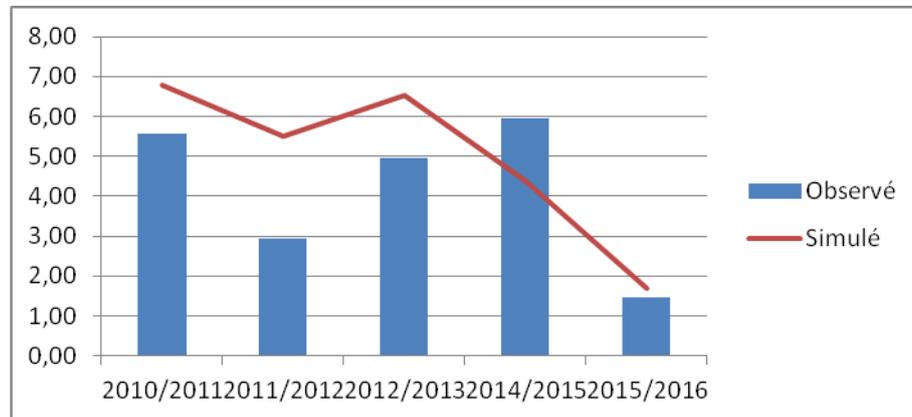


Figure 49 : Moyenne du rendement grain observé et simulé au cours des campagnes.

Les rendements en grains observés et simulés, pour toutes les campagnes de l'étude, donnent un coefficient de corrélations $r = 0,70$ (Figure 51), et un indice d'agrément (d) de 0,38 (Tableau 22). L'analyse de l'erreur de prévision (Pe) affiche une valeur moyenne de 19,16%, ce qui veut dire que le modèle surestime le rendement avec une déviation de 16,08%. La comparaison entre rendement observé et simulé, entre les campagnes, indique que le modèle explique de façon satisfaisante la relation entre le rendement en grains observé et simulé de blé.

Concernant l'effet génotype, c'est la variété Bousselem qui obtient la valeur la plus élevée du rendement grain simulé avec 5,24 t/ha, alors que le plus faible rendement est obtenu par la variété Oued Zenati avec 4,56 t/ha (Figure 50).

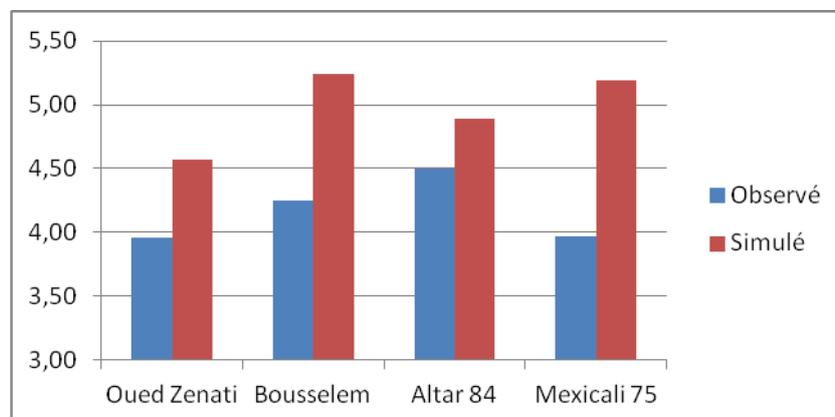


Figure 50 : Moyenne du rendement grain observé et simulé entre génotypes.

Le test t de student montre que le rendement grain simulé est très significativement différent ($p = 0,007$) du rendement grain observé de nos quatre génotypes, et qu'une faible corrélation existe entre eux avec un coefficient $r = 0,13$ (Figure 51). A l'inverse, une surestimation de 19,25%, un écart de 16,14% et un indice d'agrément d'une bonne valeur ($d = 0,77$) (Tableau 22), indiquent l'efficacité du modèle à analyser la relation entre le rendement en grains observé et simulé de nos variétés.

Tableau 22: Valeurs de la simulation des rendements et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle

Campagne	RENDEMENT						
	Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton (%)	Pe (\pm %)
2010/2011	5,57	6,78	1,21	1,22	0,28	17,88	21,72
2011/2012	2,94	5,49	2,56	2,58	0,43	46,55	86,73
2012/2013	4,96	6,52	1,57	1,85	0,43	23,99	31,45
2014/2015	5,94	4,38	1,56	1,76	0,37	-35,61	-26,26
2015/2016	1,45	1,68	0,51	0,56	0,40	13,97	16,25
Moyenne	4,17	4,97	1,48	1,60	0,38	16,08	19,16
Génotypes							
Oued Zenati	3,96	4,56	1,58	1,79	0,72	13,24	15,27
Bousselem	4,25	5,24	1,96	2,10	0,67	18,96	23,40
Altar 84	4,50	4,89	1,07	1,35	0,86	7,92	8,60
Mexicali 75	3,97	5,19	1,31	1,60	0,84	23,59	30,88
Moyenne	4,17	4,97	1,48	1,71	0,77	16,14	19,25

AAE : erreur absolue moyenne ; RMSE: racine de l'erreur quadratique moyenne; d : L'indice d'agrément de Willmott ; Pe : Erreur de prévision.

Nos résultats sont en accord avec ceux de Ngetich *et al.* (2012) indiquant que les rendements céréaliers étaient légèrement sous-estimés pendant la longue saison des pluies et l'inverse pour les saisons de courtes pluies. Araya *et al.* (2010) ont utilisé Aqua-Crop pour simuler le rendement en grains de l'orge et ont signalé que le rendement en grains simulé s'écartait du rendement observé entre 13% et 15%.

Guendouz *et al.* (2014) ont trouvé que le rendement grain observé et simulé corrélait très bien donnant un $r = 0,99$ ($p < 0,05$) une pente de 0,49 et un (d) de 0,56 indiquant que le modèle expliquait 99% de la relation entre rendement en grains de blé observé et simulé lors de la simulation du rendement grainier du blé dur en utilisant Aqua-Crop dans les hautes plaines Sétifiennes.

Dans le même contexte, Maamri *et al.* (2018), indique que le rendement en grain observé et simulé donne un coefficient de corrélation $r = 0,30$, une pente de régression de 0,41 et un indice d'agrément (d) de 0,54. Ceci indique que le modèle explique de manière satisfaisante la relation entre le rendement en grain de blé observé et simulé.

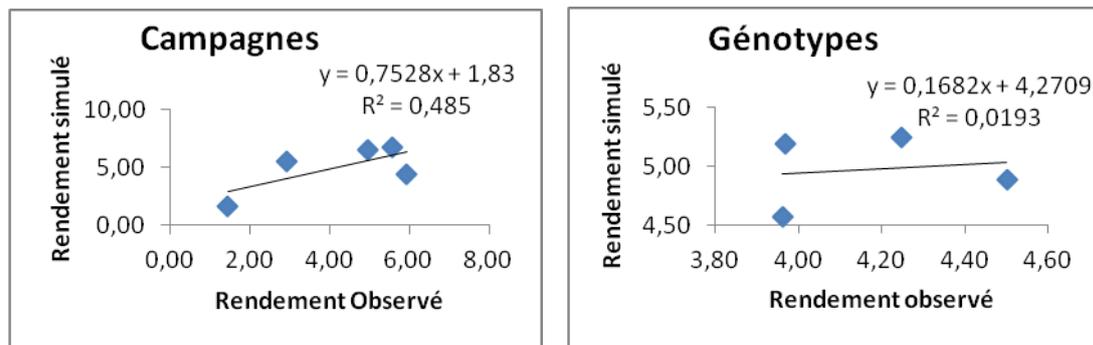


Figure 51 : Relation entre le rendement simulé et observé.

Dans notre étude, les paramètres statistiques utilisés pour l'évaluation du modèle de culture Aqua-Crop, à savoir AAE et RMSE, donnent des valeurs moyennes respectives de 1,21 et 1,22 tonne ha^{-1} pour l'ensemble des campagnes et 1,58 et 1,79 tonne ha^{-1} pour tous les génotypes (Tableau 22).

Chourghal (2016), en évaluant un modèle de culture sur le blé dur dans la région semi-aride de Bordj Bou Arreridj, trouve une RMSE faible de 0,3 t ha^{-1} et un biais moyen positif de 0,06 t ha^{-1} indiquant que le modèle surestime légèrement les rendements réels.

Guendouz *et al.* (2014), mentionne que le test t de student a montré que le rendement grain simulé était significativement différent ($p = 0,047$) du rendement grain observé avec RMSE et AAE de 1,86 et 1,77 t ha^{-1} , respectivement et que le modèle surestimé le rendement du grain de 39,4%.

Andarzian *et al.* (2011) ont trouvé que les critères d'évaluation du modèle calculé entre le rendement simulé et le rendement mesuré étaient RMSE = 0,27 t ha^{-1} , D-index = 0,97 et $R^2 = 0,95$; Ils concluent que le modèle Aqua-Crop pourrait très bien prédire le rendement grainier du blé dans la région centrale de l'Iran.

4-2- BIOMASSE AERIENNE (BIO)

La meilleure biomasse simulée est enregistrée durant la saison 2012-2013 avec 13,77 t/ha. Cependant, la saison 2014-2015 cumule la plus faible biomasse aérienne simulée avec 11,03 t/ha, donnant une moyenne générale de 12,67 t/ha (Figure 52).

Généralement, dans nos cinq campagnes d'étude, le modèle surestime la biomasse aérienne avec une différence entre la biomasse simulée et observée de 1 tonne ha^{-1} , une erreur de prédiction (Pe) de 8,57% et une déviation de 7,90% entre les campagnes (Tableau 23).

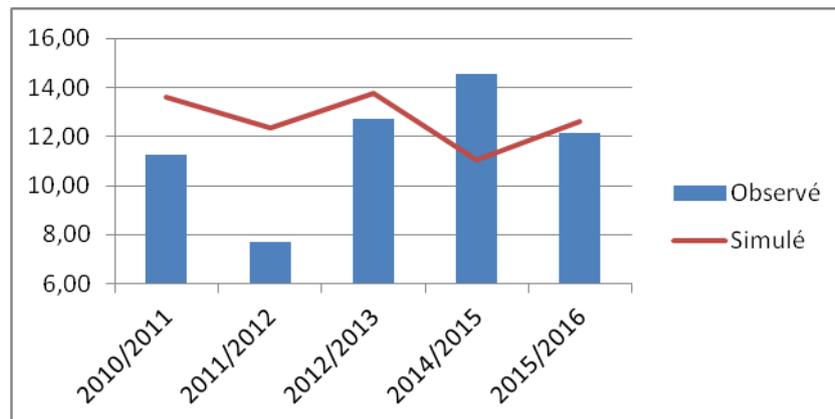


Figure 52 : Moyenne de la biomasse aérienne observée et simulée au cours des campagnes.

Les résultats de l'effet génotype, montrent que la moyenne générale de la biomasse aérienne simulée est 12,67 t/ha. Elle varie entre 12,74 et 12,60 t/ha, Oued enregistre la valeur la plus importante alors que celle d'Altar 84 est la plus faible (Figure 53).

Globalement, la différence entre la biomasse simulée et observée entre les génotypes est de 1 tonne ha^{-1} , ce qui indique que le modèle surestime la biomasse de 8,59% avec un écart de 7,91% (Tableau23).

Zelege *et al.* (2012) ont utilisé Aqua-Crop pour simuler à la fois la biomasse totale et le rendement en grains de canola (*B. napus* L.) et ont confirmé que la différence entre les valeurs observées et simulées était <10%. Dans les travaux de Maamri *et al.* (2018), la différence entre la biomasse prévue et récoltée était de 0,80 tonne ha^{-1} , donnant une surestimation de 6,25%.

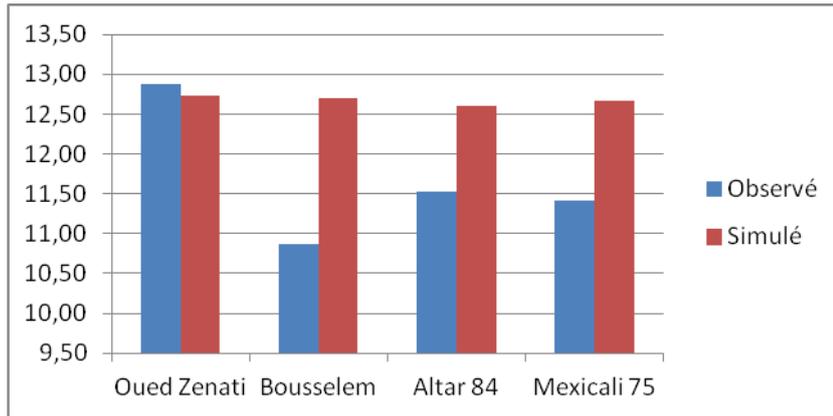


Figure 53 : Moyenne de la biomasse aérienne observée et simulée des génotypes.

Entre les campagnes d'étude, une faible relation négative est observée entre les prédictions du modèle et les données de biomasse mesurées avec un coefficient de corrélation $r = -0,24$ (Figure 54). Avec un indice d'agrément (d) de 0,33, une racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 2,42 tonnes ha⁻¹ et une erreur absolue moyenne entre données simulées et observées (AAE) de 2,36 tonnes ha⁻¹ (Tableau 23), notre modèle de culture (Aqua-Crop) n'a pas réussi à prévoir le paramètre de biomasse aérienne.

Tableau 23 : Valeurs de la simulation de la biomasse aérienne et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle

Biomasse aérienne							
Campagne	Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviations (%)	Pe (\pm %)
2010/2011	11,25	13,60	2,36	2,42	0,31	17,33	20,89
2011/2012	7,69	12,34	4,65	4,66	0,12	37,69	60,47
2012/2013	12,71	13,77	1,61	2,42	0,42	7,68	8,34
2014/2015	14,56	11,03	3,53	3,62	0,30	-31,91	-24,24
2015/2016	12,16	12,63	0,77	0,82	0,48	3,74	3,89
Moyenne	11,67	12,67	2,58	2,79	0,33	7,90	8,57
Génotypes							
Oued Zenati	12,88	12,74	2,50	3,07	0,27	-1,11	-1,10
Bousselem	10,87	12,70	3,22	3,56	0,18	14,44	16,87
Altar 84	11,52	12,60	2,24	2,65	0,32	8,54	9,33
Mexicali 75	11,42	12,66	2,38	2,94	0,37	9,80	10,87
Moyenne	11,67	12,67	2,58	3,06	0,28	7,91	8,59

AAE : erreur absolue moyenne ; RMSE: racine de l'erreur quadratique moyenne; d : L'indice d'agrément de Willmott ; Pe : Erreur de prévision.

La comparaison des génotypes avec le test t de Student indique que la biomasse simulée est significativement différente ($p = 0,057$) de la biomasse observée avec RMSE et AAE de 3,06 et 2,58 tonnes ha^{-1} , respectivement (Tableau 23). La figure 54 montre une faible relation entre la biomasse aérienne récoltée et simulée avec un coefficient de corrélation $r = 0,45$. La faible valeur de l'indice d'agrément ($d = 0,28$) indique que la simulation de la biomasse aérienne par le modèle n'est pas réussit.

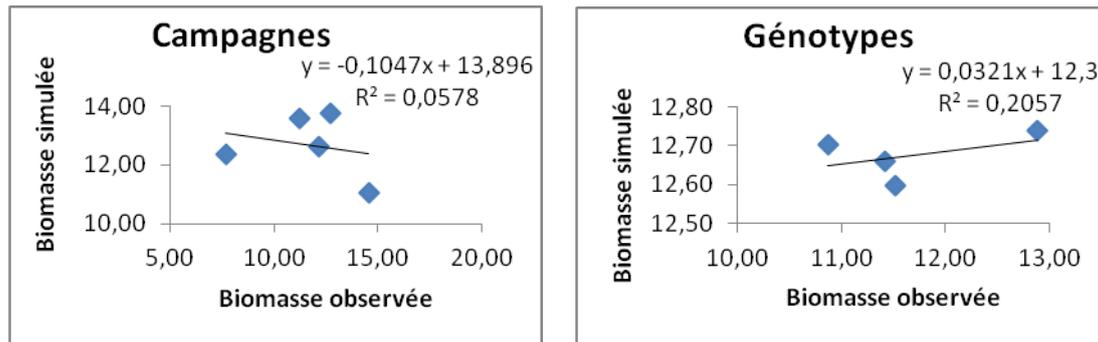


Figure 54 : Relation entre la biomasse aérienne simulée et observée.

Guendouz *et al.* (2014), trouvent que la biomasse observée et simulée étaient bien corrélées donnant un $r = 0,98$ ($p < 0,2$) une pente de 0,29 et un (d) de 0,56 indiquant que le modèle expliquait 98% de la relation entre biomasse de blé observée et modélisée. Andarzian *et al.* (2011) ont mentionné que les valeurs calculées des indices statistiques de biomasse aérienne finale, RMSE normalisé, indice D et R^2 étaient de 0,6 t ha^{-1} , 4,4%, 0,97 et 0,95, respectivement.

Khebbat (2016) a utilisé l'Aqua-Crop dans la même région que la notre (zone semi aride de Sétif) pour simuler la productivité d'autres variétés de blé dur, où durant la campagne agricole 2013-2014, la biomasse aérienne était caractérisée par un (d)= 0,43, une AAE = 6,73 tonne ha^{-1} , une RMSE = 6,74 tonne ha^{-1} et une déviation de 82,62%.

Todorovic *et al.* (2009) ont évalué l'aptitude de trois modèles (Aqua-Crop, CropSyst et WOFOST) à simuler la croissance du tournesol et ont rapporté que le modèle Aqua-crop a surestimé la biomasse de tournesol de 1,2%, tandis que CropSyst et WOFOST l'ont sous-estimé de 4,6% et 0,3% respectivement. Les auteurs ont conclu que, même si le modèle Aqua-Crop nécessite moins d'informations d'entrée que les deux autres modèles, il fonctionnait de manière similaire par rapport à eux pour modéliser la biomasse totale et le rendement en grains.

4-3- INDICE DE RECOLTE (IR)

La moyenne générale de l'indice de récolte simulé est de 38,95 %. C'est la première année de l'essai (2010-2011) qui a le meilleur indice simulé avec une valeur de 49,90%; par contre, l'indice le plus faible est obtenu durant la dernière saison (2015-2016) avec une valeur de 13,34% (Figure 55).

Dans nos cinq campagnes de l'étude, Aqua-crop surestime l'indice de récolte avec un (Pe) d'une valeur de 8% et une déviation par rapport aux valeurs observées de 7,41% (Tableau 24).

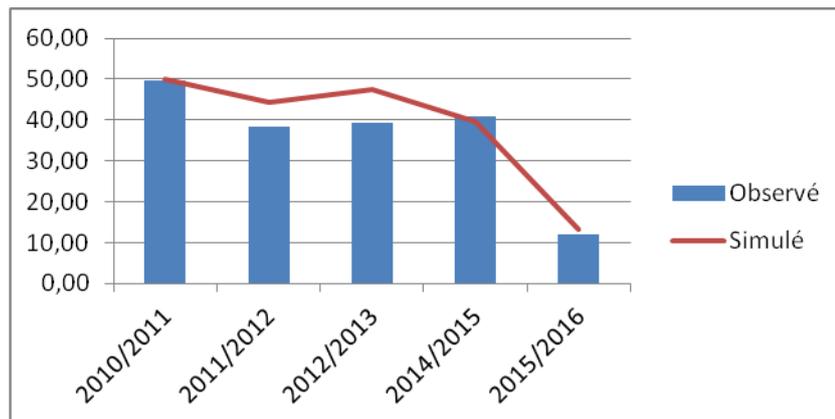


Figure 55 : Moyenne de l'indice de récolte observé et simulé au cours des campagnes.

Entre les génotypes, la moyenne de l'indice de récolte simulé est 38,96% variant entre 35,57 % pour la variété Oued Zenati et 40,83 et 40,88% pour les variétés Mexicali 75 et Bousselem respectivement (Figure 56).

La différence entre l'indice de récolte simulé et observé entre les génotypes est de 2,9%, donnant une erreur de prévision $Pe = 8,03\%$ et une déviation d'une valeur de 7,43%. Ceci montre parfaitement que le modèle Aqua-Crop surestime l'indice de récolte (Tableau 24).

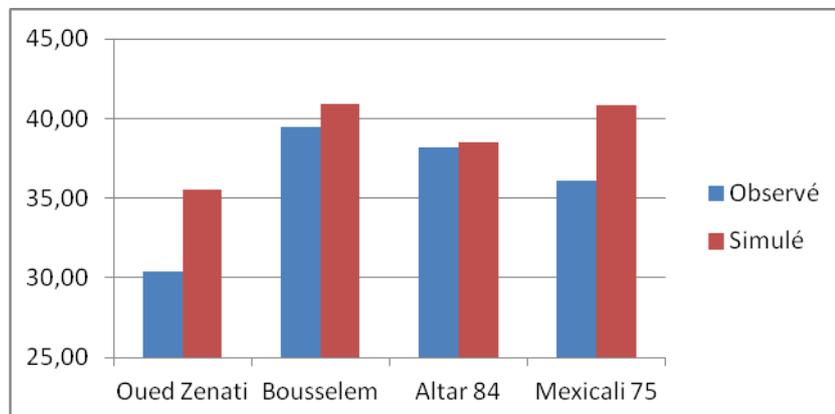


Figure 56 : Moyenne de l'indice de récolte observé et simulé des génotypes.

Guendouz *et al.* (2014) rapportent que globalement dans les années d'étude (de 2010 à 2013), la différence entre l'indice de récolte observé et simulé était de 4,7% indiquant que le modèle surestimait l'indice de récolte de 11,04%, avec une absence de signification du test- t de Student pour ce paramètre. A l'inverse, Maamri *et al.* (2018) signalent que le modèle sous-estime l'indice de récolte de -18,48%.

Tableau 24: Valeurs de la simulation de l'indice de récolte et des paramètres utilisés pour l'évaluation du modèle

Campagne	Indice de récolte						
	Observé	Simulé	AAE	RMSE	d	Déviaton (%)	Pe (\pm %)
2010/2011	49,77	49,90	2,00	2,22	0,23	0,26	0,26
2011/2012	38,41	44,45	6,04	8,05	0,74	13,59	15,73
2012/2013	39,44	47,38	7,94	8,85	0,60	16,76	20,13
2014/2015	40,80	39,68	4,67	5,30	0,43	-2,80	-2,72
2015/2016	11,89	13,34	3,67	4,08	0,47	10,73	12,02
Moyenne	36,06	38,95	4,86	5,70	0,49	7,41	8,00
Génotypes							
Oued Zenati	30,43	35,57	6,89	8,74	0,86	14,46	16,90
Bousselem	39,49	40,88	4,08	4,95	0,97	3,39	3,51
Altar 84	38,22	38,55	13,13	18,41	0,27	0,84	0,85
Mexicali 75	36,10	40,83	6,25	7,26	0,94	11,59	13,11
Moyenne	36,06	38,96	7,59	9,84	0,76	7,43	8,03

AAE : erreur absolue moyenne ; RMSE: racine de l'erreur quadratique moyenne; *d* : L'indice d'agrément de Willmott ; Pe : Erreur de prévision.

Dans notre étude, l'indice de récolte simulé est très corrélé avec celui observé entre les campagnes avec $r = 0,90$ (Figure 57). L'indice d'agrément (*d*) est de 0,49 indiquant que le modèle simule acceptablement l'indice de récolte. Les valeurs intersaison de l'erreur absolue moyenne entre données simulées et observées (AAE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont de 4,86 tonne ha⁻¹ et 5,70 tonne ha⁻¹ respectivement (Tableau 24).

La comparaison entre nos quatre génotypes révèle que l'indice de récolte observé et simulé sont bien corrélés ($r = 0,82$) (Figure 57), donnant une pente régression de 0,51 et un indice d'agrément (*d*) de 0,76. Le test t de Student montre que l'indice de récolte simulé n'est pas significativement différent ($p = 0,26$) de l'indice de récolte observé avec un RMSE et un AAE de 9,84 et 7,59%, respectivement (Tableau 24).

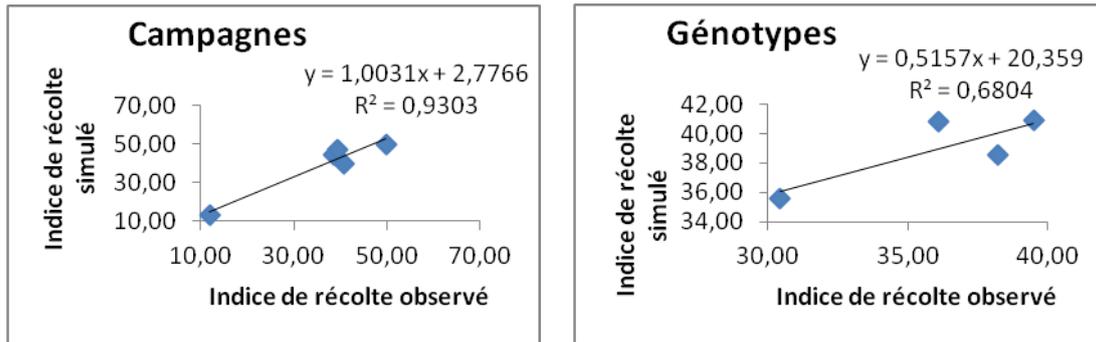


Figure 57 : Relation entre l'indice de récolte simulé et observé.

Khebbat (2016) a trouvé que le test- t de Student a montré que l'indice de récolte simulé n'était pas significativement différent ($p = 0,18$) de l'indice de récolte observé durant la campagne agricole 2013-2014 avec un indice d'agrément, RMSE et AAE de 0,33, 24,14 et 23,24 tonne ha^{-1} respectivement.

Aggarwal *et al.* (1986) ont trouvé que la tendance de l'indice de récolte de la culture du blé dans les traitements avec des conditions d'eau presque optimales a augmenté avec le temps et a atteint le niveau de référence. Mais il n'a pas augmenté dans les traitements pluviaux parce qu'il a été stoppé par le stress hydrique. Selon Steduto *et al.* (2009), l'ajustement de l'indice de récolte au stress hydrique dépend du moment et de l'ampleur du stress hydrique.

CONCLUSION

CONCLUSION

En Algérie, la production agricole en zone semi aride d'altitude est fortement limitée par plusieurs contraintes abiotiques, dont, les principales sont la sécheresse et les gelées printanières. Ces deux phénomènes très fréquents sont les causes principales de la faiblesse des rendements et l'irrégularité de la production. Stabiliser la production sous ces conditions est aussi important que de chercher à l'améliorer. Certains géotypes se stabilisent mieux que d'autres ; ceci est incontestablement du à leurs paramètres phéno-morphologiques. Cependant, il est difficile de faire un progrès quelconque, lorsque les stress qui entravent la croissance de la plante augmentent en fréquence et en intensité, notamment, lorsqu'ils sont imprévisibles. Ces stress sont en effet, de nature intermittente, et peuvent se manifester à n'importe quel stade de développement du blé dur.

Cette modeste recherche a permis de décrire le comportement de quelques variétés du blé dur, de mettre en relief certains des paramètres précités, et de montrer aussi leur rôle dans l'obtention d'un rendement satisfaisant afin de diminuer les effets néfastes des contraintes.

L'analyse de variance montre ainsi qu'il y a une différence très hautement significative pour l'effet campagne, géotype et interaction campagne X géotype pour l'ensemble des variables étudiées. De ces résultats, il a été conclu que le principal facteur qui influence les rendements du blé dur est l'environnement ; que le processus de sélection des géotypes performants et stables est particulièrement compliqué par le phénomène de l'interaction géotype-environnement (G×E).

Par conséquent, il est impératif d'avoir une compréhension des effets de ces interactions sur l'évaluation des géotypes, ce qui aidera mieux à appliquer des méthodes analytiques appropriées.

La caractérisation des campagnes révèle la présence de trois groupes, le premier groupe (G1) concerne la cinquième année 2015 /16 uniquement. C'est un groupe à potentialités limitées où tous les caractères mesurés enregistrent des valeurs faibles, et cela est probablement dû à la déficience des précipitations (216,66 mm seulement). Le deuxième groupe (G2) est formé par les deux saisons 2012/13 et 2014/15, la majorité des variables mesurées présentent les meilleures valeurs, donc on

peut le considérer comme un groupe à hautes potentialités. Les deux premières campagnes 2010/11 et 2011/12 constituent le troisième groupe (G3), à moyennes potentialités, avec des variables de valeurs intermédiaires. Les trois groupes de campagnes ainsi obtenus (G1, G2 et G3) diffèrent essentiellement par le nombre de d'épis/m², le nombre de grains/m² et aussi le rendement. Cependant, ils convergent en matière de poids de mille grains et l'indice de récolte.

Pour la typologie variétale, les deux variétés Oued Zenati et Polonicum constituent le premier groupe (G1), celui des variétés locales. Le deuxième groupe (G2) est formé par les génotypes sélectionnés localement (Bousselem, Waha et Hoggar) et par les génotypes introduits (Mexicali75 et Altar84). Donc, on peut le considérer comme un groupe des variétés améliorées. Il apparaît clairement que les groupes des variétés obtenues G1 et G2, diffèrent principalement par le nombre de grains/m² et par l'indice de récolte. Toutefois, peu de différences ont été enregistrées, en moyenne, entre les deux groupes pour le nombre d'épis/m², le poids de mille grains, le rendement en grains et la biomasse aérienne.

Le premier groupe (G1) des variétés locales est caractérisé par un poids de mille grains et une biomasse aérienne de valeur supérieure, tandis que le groupe des variétés améliorées (G2) se distingue par ces bonnes valeurs de tallage épis, fertilité, productivité et de l'indice de récolte.

La présente étude s'est fixée comme second objectif la quantification du stress hydrique, l'analyse de ses effets sur le rendement et ses composantes au cours des différentes phases de développement de nos sept variétés contrastées du blé dur.

Les résultats obtenus ont dans ce cadre montré que le nombre de jours du cycle cultural intégral de nos génotypes est en relation très significative et positive avec le stress hydrique, bien qu'il soit négativement corrélé avec le rendement. En effet, Les résultats montrent que les génotypes qui ont subi moins de stress hydrique à l'épiaison sont plus précoces et réalisent les meilleurs rendements en grains (Bousselem et Altar84.). Contrairement aux génotypes tardifs (Oued zenati) qui ont subi plus de stress hydrique.

Nos résultats indiquent une grande variabilité climatique, d'ordre pluviométrique, à laquelle est soumise la production du blé dur sous les conditions des

hautes plaines orientales. Ils montrent aussi que la contrainte hydrique, de nature intermittente, est doublement variable, du point de vue de son intensité et de son positionnement le long du cycle de la culture.

Il existe une grande variation à l'échelle phénologique au sein de ce groupe de génotypes où le stress hydrique total au cours des cinq saisons de culture (2010-2016) varie entre 0,2 (20%) au stade tallage-épiaison à 0,66 (66%) au stade épiaison-maturité. La simulation montre que le coefficient de stress hydrique affiche une moyenne entre les campagnes de 0,44.

Le bilan hydrique indique deux périodes de stress, la première a été observée avant la levée ($K_s= 0,45$) et ne semble pas avoir affectée la culture, car les besoins en eau des génotypes durant cette phase sont faibles et ils dépendent plus sur leurs réserves internes (de la graine) que sur les apports externes (environnement de culture). En revanche, la deuxième période de stress ($K_s= 0,66$) a eu probablement, un effet contraignant sur la culture, étant donné qu'elle a coïncidé avec la phase épiaison-maturité, deux stades importants de la croissance et du développement de la végétation.

Par ailleurs, on doit souligner que Oued Zenati qui potentiellement et réellement transpire le plus, constitue, par conséquent, le génotype le plus stressé. Bousselem et Altar84 quant à eux, possèdent la plus faible transpiration potentielle et réelle mais l'écart entre la transpiration potentielle et réelle, chez ces derniers, est moins important comparativement aux premiers génotypes. Autrement dit, ils sont considérés comme des génotypes moins stressés.

Il faut rajouter ici, que le stress hydrique est corrélé significativement et d'une manière négative avec le nombre de grains par m^2 et avec l'indice de récolte.

Des relations de corrélations négatives moyennes relient le stress hydrique avec le rendement en grains et avec le nombre d'épis par m^2 , alors que le poids de mille grains et la biomasse aérienne sont en relation positives avec le stress hydrique.

Le dernier objectif de notre étude consiste à l'évaluation du modèle AquaCrop (v3.0) à simuler les composants du rendement pour le blé dur en conditions semi-arides. Les résultats montrent ainsi que le rendement en grain, la biomasse aérienne et l'indice de récolte peuvent être simulés avec une précision relative.

Dans l'ensemble, le lien entre le rendement en grains du blé simulé et observé est satisfaisant avec $d = 0,77$, RMSE et AAE de 1,71 et 1,48 tonnes ha⁻¹, respectivement.

En ce qui concerne la comparaison de la biomasse aérienne finale simulées et observées, les résultats de toutes les saisons de culture donnent un $d = 0,33$, un RMSE et un AAE de 2,79 et 2,58 tonnes ha⁻¹, respectivement.

En outre, l'indice de récolte observé et simulé donne un $d = 0,76$, RMSE et AAE de 9,84 et 7,59%, respectivement. Le test t de Student est significativement différent entre les valeurs simulées et observées pour les deux paramètres rendement en grain et biomasse aérienne.

Pour conclure, on doit souligner que cette étude a révélé la fiabilité du modèle dit « Aqua-Crop » pour les simulations de rendement grains et l'indice de récolte. On affirme ainsi, que si ce modèle est correctement calibré, il peut être utilisé dans l'élaboration de stratégies pour améliorer les décisions de gestion sur le terrain. Grâce à sa simplicité, ses données d'entrée nécessaires minimales facilement disponibles ou accessibles, Aqua-crop, constitue un outil utile et convivial, pour les simulations de scénarios à des fins de planification et pourra être utilisé par les économistes, les administrateurs et les gestionnaires de l'eau.

Aussi et afin de permettre une bonne exploitation du modèle au niveau local, il est recommandé de multiplier les applications de simulation à l'échelle du temps et de l'espace, dans le but de constituer une base de données comportant des informations sur les différents scénarios de la sécheresse.

Enfin, l'utilisation d'un modèle de culture, malgré ses imperfections, représente un premier pas et une contribution dans l'utilisation de la modélisation dans le secteur de l'agriculture dans notre zone semi aride.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

01. Abayomi, Y. & Wright, D. 1999. Effects of water stress on growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Trop. Agric*, 76: 120–125.
02. Abbassenne, F., Bouzerzour, H. & Hachemi, L., 1997. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride. *Annales Agronomiques INA*, 18 : 24-36.
03. Abbate, P.E., Andrade, F.H. & Culot, J.P., 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 124, 351–360.
04. Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P. & Bindraban, P.S., 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Res.* 54, 245–257.
05. Acevedo, E. 1991. Improvement of winter cereal crops in Mediterranean environments. Use of yield, morphological and physiological traits. In Acevedo, E. (ed): *Physiology-Breeding of Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments*. INRA, Paris . *Le Colloque.* 55 , 273–305.
06. Acevedo, E. & Ceccarelli, S., 1987. Role of physiologist-breeder in a breeding program for drought resistance conditions. in : *Drought Resistance in Cereals*, Baker, F.W.G. (éd.). CAB, Wallingford, pp. 117-139.
07. Acevedo, E., Hsiao, T. C. & Henderson, D. W. 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physio*, 48: 631-636
08. Acevedo, E., Harris, H. & Cooper, P. J. M. 1991. Crop architecture and water use efficiency in Mediterranean environments. In *Soil and Crop Management for Improved Water Use Efficiency in Rainfed Areas*, H. Harris, P.J.M. Cooper and M. Pala, eds. p.106-118. ICARDA, Syria
09. Acock, B. & Acock, M. 1991. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. *Agro J* 83:56–61.
10. Aggarwal, P. K., Singh, A. K., Chaturvedei, G. S. & Sinha, S. K. 1986. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil-water environment. II. Evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and grain yield. *Field Crops Res.*, 13: 301-315.
11. Ahmad, R., Qadir, S., Ahmad, N. & Shah, KH. 2003. Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions. *Int J Agric Bio*, 5:7–9.
12. Ait-Kaki, S. 2008. Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologiques chez le blé dur en Algérie. Thèse Doctorat Biologie. Université Badji Mokhtar de Annaba (UBMA).
13. Akbar, M., Muhammad, T., Tayyab, J. & Muhammad, A. 2001. Evaluation of exotic wheat germplasm for seed yield and its components under rainfed conditions. *Sarhad J Agric*, 17(4): 511-513.
14. Al Hakimi, A. 1995. Sélection sur base physiologique et utilisation des espèces tétraploïdes du genre *Triticum* pour l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse du blé dur. Thèse de doctorat, Montpellier, 220 pages.
15. Al Hakimi, A. & Monneveux, P. 1993. Variation of some physiological traits of drought tolerance in tetraploid wheats. In Damania, A.B. (ed): *Biodiversity and Wheat improvement*. John Wiley and sons, Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, 199-216 p.
16. Ali Dib, T., Monneveux, P. & Araus, J.L., 1992. Adaptation à la sécheresse et

- notion d'idéotype chez le blé dur. II : caractères physiologiques d'adaptation. *Agronomie*. 12 : 381-393.
17. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 56. Rome, FAO.
 18. Ammar, K. 2015. Enhancing the Sustainability of Global Durum Wheat Production. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.
 19. Amokrane, A. 2001. Evaluation et utilisation de trois sources de germoplasme de blé dur (*Triticum durum* Dref). Thèse de Magister, institut d'agronomie, Université El Hadj Lakhder, Batna, 80 P.
 20. Andarzian, B., Bakhshandeh, A.M., Bannayan, M., Emam, G., Fathi, G. & Alami Saeed, G. 2008. Wheat Pot: a simple model for spring wheat yield potential using monthly weather data. *Biosyst Eng*, 99:487-495.
 21. Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. & Rahnama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100:18.
 22. Angus, J.F. & Van Herwaarden, V.F. 2001. Increasing water use and water-use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.*, 93: 290-298.
 23. Annerose, D. J. M. 1990. Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse de doctorat es Sciences Naturelles, Université Paris VII, 282p.
 24. Aouade, G. 2012. La partition de l'évapotranspiration en évaporation du sol et transpiration de la végétation dans le continuum « Sol-Plante-Atmosphère » pour une culture de blé dans la région du Haouz : Techniques isotopiques et modélisation. Mémoire de Master, Université Cadi Ayyad, Maroc, 116 pages.
 25. Araus, J.L., Villegas, D., Aparicio, N., Garcia del Moral, L.F., El Hani, S., Rharrabti, Y., Ferrio, J.P. & Royo, C. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Science* 43, 170-180.
 26. Araya, A., Habtub, S., Hadguc, K. M., Kebedea, A. & Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97: 1838-1846.
 27. Ashraf, M. Y. 1998. Yield and yield components response of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under different soil water deficit conditions. *Acta Agron Hung*, 46: 45-51.
 28. Aspinal, D., Nichols, P.B. & May, L.H. 1964. The effect of soil moisture on growth of barley. *Austr. J. Agric.*, 15 :729-745
 29. Attia, F. 2007. Effet du stress hydrique sur le comportement écophysique et la maturité phénolique de la vigne (*Vitis vinifera* L). Étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. Thèse INP Toulouse (France), 194p
- B-**
30. Bagga, A.K., Ruwal, K.N. & Asana, R.D., 1970. Comparaison of responses of some indian and semi-dwarf Mexican wheats to irrigated cultivation. *Indian J. Agric. Sci.*, 40 : 421-427.
 31. Baghem, O. 2012. Effet des Techniques Culturelles sur la Biodiversité Faunistique des céréales dans la zone Semi-aride. Mémoire de magister. Faculté SNV. UFA, Sétif. 65 p.

32. Bahlouli, F. 2006. Etude de la contribution des assimilats de la tige à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux stress abiotiques sous climat méditerranéen. Thèse de Doctorat, INA, El-Harrach, Alger, 98 pp.
33. Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A. & Hassous, K.L., 2005. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Journal of Agronomy* 4 : 360-365.
34. Baier, W. 1979. Note on the terminology of crop-weather models. *Agric Meteorol* 20: 137– 145
35. Bajji, M., Lutts, S., & Kinet, J. M. 2000. La résistance au stress hydrique chez le blé dur : Comparaison des comportements au niveau cellulaire et au niveau de la plante entière. Zaragoza : *ciheam*. Options Méditerranéennes : série A. séminaires méditerranéens, 40 : 227- 231.
36. Baldy, G. 1974. Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et de leurs influences sur la production des principales zones céréalières. Document du Projet céréale, 170 pages.
37. Baldy, C. 1993. Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en méditerranée occidentale. *Colloque* 55 : 83-99 INRA ed, Paris.
38. Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., & Jeuffroy, M.H. 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environmental effects. *Crop Sci.* 45: 1141–1150.
39. Bechtel. 1975. Développement des ressources en eau et de l'Agriculture. Région de Sétif. Etude préliminaire et conditions de réalisation – volume II.
40. Belhssen, E., This, D. & Monneveux P., 1995. L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahiers Agricultures*. 4 / 251 – 261.
41. Ben Naceur, M., Gharbi, M.S. & 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.
42. Benbelkacem, A. 2013. Rapport des résultats du projet "Enhancing Food Security in Arab Countries" *Icarda-INRAA*. 35 pages.
43. Benbelkacem, A. & 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.
44. Benlaribi M., Monneveux, P. & Grignac P. 1990. Etude des caractères d'enracinement et leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Dref). *Agronomie*, 16 : 305-322.
45. Benmahammed, A., Bouzerzour, H., Mekhlouf, A. & Benbelkacem A. 2008. Variation de la teneur relative en eau, l'intégrité cellulaire, la biomasse et l'efficacité d'utilisation de l'eau des variétés de blé dur (*Triticum durum* Dref) conduites sous contraintes hydrique. *Recherche Agronomique, INRA*, 21, 37-47.
46. Bensalem, M. & Vierra Da Siva J.B., 1990. Mécanismes physiologiques de résistance à la sécheresse et création variétale. Rapport d'activité numéro 1, *MA/DGFRA/INRAT*, Tunisie, 23 pages.
47. Ben salem, M., Acévédo, E. & Srivastava, J.P. 1991. La sélection des céréales dans les zones arides. Synthèse. *Sécheresse*, 2: 17-20.
48. Bergez, J.-E., Debaeke, Ph., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P. & Wallach, D. 2001. MODERATO: an object-oriented decision model to help on irrigation scheduling for corn crop. *Ecological Modelling*, 137, 43-60.
49. Berka, S. & Aid, F. 2009. Réponses physiologiques des plants d'*Argania spinosa* (L.) Skeels soumis à un déficit hydrique édaphique.

- Sécheresse*, 20, 296-302.
50. Bidinger, F. R., Musgrave, R. B. & Fischer, R. A. 1977. Contribution of stored pre-anthesis assimilates to grain yield in wheat and barley. *Nature*, 270: 431-433.
 51. Black, M. 1970. Drying and the onset of germinability in developing wheat grains cereal.res-commun 8:151-156.
 52. Blum, A. 1989. Plant breeding for stress environments. Boca Raton : CRC Press eds ; 223p
 53. Blum, A. & Ebercon, A. 1976. Genotypic responses in sorghum to drought stress.III. Free proline accumulation and drought resistance. *Crop Sci.*, 16: 428-431.
 54. Blum, A. & Pnuel, Y. 1990. Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.*, 41: 799-810.
 55. Blum, A., Shpiler, L., Golan, G. & Mayer, J. 1989. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought- stress. *Field Crops Res.*, 22: 289-296.
 56. Bolte, J.P., Hulse, D.W., Gregory, S.V. & Smith, C. 2006. Modeling biocomplexity -actors, landscapes and alternative futures. *Environ Model Softw* 22: 570–579.
 57. Bonhomme, R. 1997. Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets. L'eau dans l'espace rural. C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu and F. Papy. Paris, *INRA*: 85-100.
 58. Bonjean, A. & Picard, E. 1991. Les céréales à paille. Origine-histoire-économie-sélection. Ligugé ; Poitiers : Aubin imprimeur.
 59. Bootsma, A., Boisvert, J.B., Dejong, R. Baier, W. 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne. *Sécheresse*. 277 - 285.
 60. Bouman, B.A.M., Van Keulen, H., Van Laar, H.H. & Rabbinge, R. 1996. The School-of-de-Wit crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric Systems* 52 (2- 3): 171–198.
 61. Bousba, R., Ykhlef, N., & Djekoun, A. 2009. Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *World Journal of Agricultural Sciences* 5. 5: 609 -616.
 62. Bouthiba, A. & Debaeke, P. 2009. Besoins en eau de différentes variétés de blé dur en conditions semi-Arides. Symposium international "Agriculture durable en region méditerranéenne (AGDUMED), Rabat, Maroc, 14-16 Mai 2009. 188-195.
 63. Bouzerzour, H. & Benmahammed, A. 1994. Environmental factors limiting barley grain yield in the high plateau of eastern Algeria. *Rachis*, 12: 11-14.
 64. Bouzerzour, H., Zerargui, H. & Dekhili, M. 1995. Relationships among duration of vegetative and grain filling periods, yield components and grain yield in durum wheat. *Awamia*, 75 : 15-23.
 65. Bouzerzour, H., Djekoune, A., Benmahammed, A. & Hassous L.K., 1998. Contribution de la biomasse aérienne, de l'indice de récolte et de la précocité à l'épiaison au rendement grain de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Cahier d'Agriculture* 8 : 133-137.
 66. Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Benkharbache, N. & Hassous, K.L., 2002. Contribution des nouvelles obtentions à l'amélioration et à la stabilité du rendement d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Revue*

- Recherche Agronomique de l'INRAA*, 10 : 45-58.
67. 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.
 68. Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche R, Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J .P., Hénault, C., Maraux ,F., Seguin, B. & Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur J Agron* 18:309–332.
 69. Brisson, N., Huard, F., Graux, A.I., Lebas, C. & Debaeke, P. 2006. Impact de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Note technique Agroclim INRA Avignon.
 70. Brisson, N., Launay, M., Mary, B. & Beaudoin , N. 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. *QUAE Ed.* 297p
 71. Bruckner, P.L. & Frohberg, R.C. 1987. Rate and duration of grain fill in spring wheat. *Crop Sci.* 27, 451–455.
 72. Bukhat, N. M. 2005. Studies in yield and yield associated traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought conditions. M.Sc Thesis Department of Agronomy. Sindh Agriculture University, Tandojam, Pakistan.
- C-
73. Cackett, K.E. & Wall, P.C. 1971. The effect of altitude and season length on the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Rhodesia. *Rhod. J. Agri. Res.* 9 : 107-121.
 74. Ceccarelli, S., Grando, S. & Van Leur, J.A.G. 1987. Genetic diversity in barley landraces from Syria and Jordan. *Euphytica*, 36: 389-405.
 75. Ceccarelli, S., Grando, S. & Hamblin, J., 1992. Relationships between barley grain yield measured in low and high yielding environments. *Euphytica* 64 : 49-58.
 76. Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Slingo, J.M. & Grimes, D.I.F. 2004. Design and optimisation of a large-area processbased model for annual crops. *Agric Forest Meteorol* 124 (1–2): 99–120.
 77. Charles, M. 2010. Évolution des génomes du blé (genres *Aegilops* et *Triticum*) au sein des *Poaceae*. Dynamique rapide de l'espace occupé par les éléments transposables et conservation relative des gènes. Thèse de Doctorat en sciences de l'université d'Évry-Val d'Essonne. France 149 p.
 78. Chatelin, M.H., Aubry, C., Poussin, J.C., Meynard, J.M., Massé, J., Verjux, N., Gate, P. & Le Bris, X. 2005. Déciblé, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems* 83, 77-99.
 79. Chehat, F. 2005. Les politiques céréalières en Algérie. Rapport Annuel. Agri-Med. Agriculture, pêche, alimentation et développement rural durable dans la région Méditerranéenne, *CIHEAM* 2006.
 80. Chenafi, H., Bouzerzour, H., Aidaoui, A. & Saci, A. 2006. Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian Journal Plant Sci.*, 5 : 854-860.
 81. Chmielewski F. & Kohn W. 2000. Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agric. Forest Meteorol.* 102, 253–261
 82. Chourghal, N. 2016. Impact des changements climatiques sur la culture du blé en Algérie. Thèse de doctorat sciences, ENSA, El Harrach, 181 pages.
 83. CIC. Conseil International des Céréales. 2018. Les statistiques mondiales.

- Marché des céréales*, 399.
84. Clarke, J.M. & Romagosa, I. 1991. Evaluation of excised leaf water loss rate for selection of durum wheat on dry environments. In Acevado E., Conesa A.P., Monneveux P. and Srivastva J.P. (eds.) Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediteranean environments. *Colloque n° 55*, INRA, Paris, 401-414.
 85. Clarke, J.M., Romagosa, I., Jana, S., Srivastava, J.P. & McCaig, T.N., 1989. Relation of excised leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environnements. *Can; J.Plant Sci.* 69 : 1057-1081.
 86. Cochard, H., Ridolfi, M. & Dreyer, E.,1996. Responses to water stress in an ABA-unresponsive hybrid poplar (*Populus koreana ´ trichocarpa* cv. Peace). II. Hydraulic properties and xylem embolism. *New Phytol.* 134 : 455-461.
 87. Condon, A.G., Farquhar, G.D. & Richards, R.A. 1990. Genotypic variation in carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in wheat. Leaf gas exchange and whole plant studies. *Australian Journal of Plant Physiology* 17, 9–22.
 88. Confalonieri, R., Bellocchi, G., Tarantola, S., Acutis, M., Donatelli, M., & Genovese, G. 2010. Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: Exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters. *Environmental Modelling and Software*, 25(4), 479–488.
 89. Coquillard, P. & Hill, D. 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Masson publ, Paris, France, 273 p
 90. Cros, M.J., Duru, M. & Peyre, D. 2001 : "SEPATOU : Simulation de conduites du pâturage - Exemple des menus bretons", Actes des journées AFPF, nouveaux regards sur le pâturage, 21 & 22 Mars 2001, Paris (Fourrages, à paraître).
 91. Croston, R.P. & Williams, J.T. 1981. A world survey of wheat genetic resources. IBRG. *Bulletin/80/59*, 37 pages.
 92. Curry, R.B. 1971. Dynamic simulation of plant growth I. Development of a model. *Trans ASAE* 14 (5): 946–959
 93. Curry, R.B. & Chen, L.H. 1971. Dynamic simulation of plant growth II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthesis. *Trans ASAE* 14 (6): 1170–1175
 94. Curtis, B.C., Rajaram, S. & Gómez Macpherson, H. 2002. Bread wheat. Improvement and production. *FAO Plant Production and Protection Series No. 30. FAO, Rome.*
- D-**
95. Dakheell, A.J., Nadji, I., Mahalazkshmi, V. & Peacock, J.M., 1993. Morphophysiological traits associated with adaptation of Durum wheat to harsh Mediterranean environments. *Apects of Applied Biology.* 34 : 297-307.
 96. David, C. & Jeuffroy, M.H. 2009. A sequential approach for improving Azodyn crop model under conventional and low-input conditions. *Eur. J. Agronomy.*, 31 : 177-182.
 97. David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M. & Meynard, J.M. 2005. The assessment of Azodyn-Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 23, 225-242.
 98. Davies, W.J. & Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu Rev Plant Phys Mol Bio.* 42 : 55-76.

99. Debaeke, P., Puech, J. & Casals, M.L. 1996. Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. *Agronomie*, 16 : 3-23.
100. Del Blanco, I.A., Rajaram, S. & Kronstad, W.E. 2001; Agronomic potential of synthetic hexaploid wheat-derived populations. *Crop Sci.* 41, 670–676
101. Delécolle, R., Loubet, B. & Tchamitchian, M. 1996. Calibration, sensibilité, validation des modèles. In Actes de l'Ecole – Chercheurs INRA en bioclimatologie, Tome 2, *Publication INRA*, pp 285-303.
102. Dencic, S., Kastori, R., Kobiljski, B. & Duggan, B. 2000. Evaporation of grain yield and its components in wheat cultivars and land races under near optimal and drought conditions. *Euphytica* , 1: 43-52.
103. De Raissac, M. 1992. Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. *Agro Trop.* 46 : 29-39.
104. De Wit, C.T. & Goudriaan, J. 1974. Simulation of ecological processes. Simulation monographs. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (*Pudoc*). Wageningen, Netherlands
105. Dhanda, S., & Sethi, G. 2002. Tolerance to drought stress among selected Indian wheat cultivars. *J Agric Res (Camb)*, 139: 319-26.
106. Diamond, J. 2002. Evolution, consequences and future of plant and animal domestication. *Nature*, 418(6898) :700–707.
107. Diehl, R, 1975. Agriculture générale. Edition J.B. Baillière. 396 pages.
108. Donald, C.M. 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17, 385–403.
109. Doorenbos, J. & Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper* n. 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
110. Downing, T.E., Harrison, P.A., Butterfield, R.E. & Lonsdale, K.G. 1999. Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment. Research Report No. 21, Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford.
111. Dreyer, E. 1997. Photosynthesis and drought in forest trees. *Trees-Contributions to Modern Tree Physiology*. (Rennenberg, H., Eschrich, W. and Ziegler, H., eds.). *Backhuys Publishers, pp. 215-238.
112. Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A. & Hanau, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 38:181–205.
- E-
113. Eastham ,J., Osterhuis, D. M. & Walker, S. 1984. Leaf water and turgor potential threshold values for leaf growth of wheat. *Agron J*, 76: 841-847.
114. Easterling, W., Aggarwal, P., Batima, P., Brander, K., Erda, L., Howden, M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, S. & Tubiello, F. 2007. Food, fibre and forest products. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the four assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 273–313
115. Elhani, S., Martos V., Rharrabti, Y., Royo, C. & 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.
116. El Madidi, S. & Zivy, M. 1993. Variabilité génétique des protéines de choc thermique et thermo-tolerance chez le blé. In: *Le progrès génétique passe-t-il par le repérage et l'inventaire des gènes?* (p. 173-181)

-F-

117. FAO, 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres. Algérie. Enquête AQUASTAT, 11 p.
118. Faostat. 2015. Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org>
119. Faostat. 2017. Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org>
120. Feldman, M. 2001. Origin of Cultivated Wheat. In Bonjean A.P et Angus W.J (éd.). The World Wheat Book: a history of wheat breeding. Intercept Limited, Andover, Angleterre, pp 3-58.
121. Feldman, M. & Sears, E.R. 1981. The wild gene resources of wheat. *Sci.Am.*, 244: 98-108.
122. Fellah, A., Benmahammed, A., Djekoun, A. & Bouzerzour H. 2002. Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*). *Actes de l'IAV*, Hassan II, (Maroc) 22 : 161-170.
123. Feyerherm, A. M., Paulsen, G. M and Sebaugh, J.L. 1984. Contribution to genetic improvement to recent wheat yield increases in the USA. *Agro J.* 76 : 985-988.
124. Fischer, R.A. 1973. The effect of water stress at various stages of development in yield processes in wheat. In: Slatyer RO, ed. Plant response to climatic factors. Proc Uppsala Symp. Paris: Unesco.
125. 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.
126. Fischer, R.A. & Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. 1. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.* 29, 897-912
127. Focar, M., Nguyen, H.T. & Blum, A. 1998. Heat tolerance in spring wheat. Grain filling. *Euphytica* 104 : 9-15.
128. Freeze, D. M. & Bacon, R. K. 1990. Row-spacing and seeding rate effects on wheat yields in the Mid-South. *J. Prod. Agric.* 3 : 345-348.

-G-

129. Gaff, D. F. 1980. Protoplasmic tolerance of extreme water stress. In : Turner N. C., & Kramer P. J eds. Adaptation of plants to water and high temperature stress. Wiley, NY, 207-230.
130. Gate, P.H. 1995. Ecophysiologie du blé. Technique et Documentation. Lavoisier, Paris, 351p.
131. Gate, P., Vignier, L., Vadon, B., Souici, D., Minkov, D., Lafarga, A. & Zairi M., 1996. Céréales en milieu Méditerranéen. Un modèle pour limiter les risques climatiques. *Perspectives Agricoles.* 217 : 59-70.
132. Geerts, S., Raes, D., Gracia, M., Miranda, R., Cusicanqui ,J.A., Taboada, C., Mendoza, j., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V. & Steduto, P. 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agron J.* 101 : 499-508
133. Gitay, H., Brown, S., Easterling, W. & Jallow, B. 2001. Ecosystems and their goods and services. In McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK
134. Giunta, F., Motzo, R. & Deidda, M. 1993. Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 33, 399-409.

135. Golabadi, M., Arzani, A. & 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.
136. Graux, A.I. 2011. Modélisation des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes prériaux. Voies d'adaptation des systèmes fourragères. Thèse doc, Univers Blaise Pascal, Clémont Férrand, 528p
137. Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z. & Achiri, A. 2014. Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi arid conditions in Eastern Algeria. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 3(2): 168-176.
138. Gupta, N. K., Gupta, S. & Kumar, A. 2001. Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield in wheat cultivars at different growth stages. *J Agron*, 86: 1437-1439.
- H-**
139. Hafez Khan, A., Ashraf, M.Y. & Azmi, A.R. 1993. Osmotic ajustement in wheat. A response to water stress. *Pak.J. Sci.ind. res.*, 36 (4): 151-154.
140. Hafid, R.E., Smith, D.H., Karrou, M. & Samir, K. 1998. Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a Mediterranean environment. *Euphytica* 101, 273–282.
141. Hafsi, M. 2001. Adaptation du blé dur dans les conditions des hautes plaines Sétifiennes. Thèse de doctorat d'Etat ès-sciences. Faculté des sciences, UFAS, Sétif, Algérie, 80 p.
142. Hafsi, M. 2016. Adaptation du blé dur en condition de stress hydrique et thermique. *Éditions universitaires européennes*. 80pages.
143. Hakanson, L. 1995. Optimal size of predictive models. *Ecol Model*: 78, 195–204.
144. Hammer, G.L., Kropff, M.J., Sinclair, T.R. & Porter, J.R. 2002. Future contributions of crop modelling – from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur J Agron* 18(1-2):15-31.
145. Hannachi, A. 2013. Analyse diallèle de quelques caractères associés à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab, Blida, 106 pages.
146. Hansen, J.W. & Jones, J.W. 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agric Syst* 65 (1): 43–72.
147. Hansen, J.W., Potgieter, A. & Tippett, M.K. 2004. Using a general circulation model to forecast regional wheat yields in northeast Australia. *Agric Forest Meteorol* 127 (1–2): 77–92.
148. Hanson, AD., May, AM., Grumet, R., Bode J., Jamiesson, GC. & Rhodes, D. 1985. Betaine synthesis in chenopods: localization in chloroplast. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 82, 3678-3682.
149. Harlan, J.R. 1975. *Crops & Man*. 2nd Edition, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Inc., Madison.
150. Havaux, M. 1988. Effect of temperature on the transition between state 1 and 2 in intact maize leaves. *Plant physiol.* 26 : 245-251.
151. Hay, R.K.M. & 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.
152. Hinckley, T.M., Braatne J. 1994. Stomata. In : *Plant-environment interactions*.

- Wilkinson RE, eds. New York : Marcel Dekker Inc, pp. 323-355
153. Hochman, Z. V. I. 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field Crop Res*, 5: 55-67.
 154. Hoogenboom, G. 2000. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agri For Meteorolo* 103: 137–157.
 155. Housley, T.L., Kirleis, A.W., Ohm, H.W. & Patterson, F.L., 1982. Dry matter accumulation in soft red winter wheat seeds. *Crop Sci.* 22, 290–294.
 156. Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & Fereres, E. 2009. Aqua-Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron J*, 101: 448–459.
 157. Hurd, E.A. 1974. Phenotype and drought resistance in wheat. *Agricultural Meteorology* 14: 19-25.

-J-

158. Jacovides, C. P. & Kontoyiannis, H. 1950. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agric. Water Manag.* 1995, 27:365-371.
159. Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., & Francis, G.S. 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur. J. Agron.* 8: 161–179.
160. Jeuffroy, M.H., & Recous, S. 1999. Azodyn: A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *Eur. J. Agron.* 10(2): 129–144.
161. Jeuffroy, M.H., Bergez, J.E., David C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.M., Reau, R. & Surleau, C. 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri Editions.
162. Jonard, P. & Koller J. Les facteurs de la productivité chez le blé. Résultats obtenus en 1948 et 1949. *Ann. Am. Plant.* 2: 256-276
163. Jones, J.W. & Luyten, J.C. 1998. Simulation of biological processes. pp. 19-62. In: Peart, R.M. and R.B. Curry (eds.). *Agricultural Systems. Modeling and Simulation*, Marcel Dekker, New York, NY.

-K-

164. Kamelli, A. & Losel, D.M. 1995. Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under stress. *J. Plant Physiol.* 145 : 363-366.
165. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., & Smith, C.J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18(3-4): 267–288.
166. Khebbat, Z. 2015. Etat hydrique du sol et performance d'une collection de variétés de blé dur. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 87 pages.
167. Kellou, R. 2008. Analyse du marché algérien du blé dur et les opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pôle de compétitivité Quali-Méditerranée. Le cas des coopératives Sud Céréales, Groupe coopératif Occitan et Aude coop. Thèse de Master of Science du CIHEAM – IAMM n° 93.

168. Khlestkina, E.K. & Salina, E.A. 2001. Genome- specific markers of tetraploid wheats and their putative diploid progenitor species. *Plant Breed*, 120: 227-232.
169. Kimber, G. & Sears, E.R. 1987. Evolution in the genus *Triticum* and the origin of cultivated wheat. In: *Wheat and Wheat Improvement*, 2nd Ed (Heyne EG, Ed.). American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 154-164.
170. Kiniry, J. R. 1993. Nonstructural carbohydrate utilisation by wheat shaded during grain growth. *Agron J*, 85: 844-849.
171. Kirby, E.J.M., Appleyard, M. & Fellows, G. 1985. Effects of sowing date and varieties on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley plant. *Agronomie*, 5 : 117-126.
172. Korichi, M. 1992. Contribution à l'étude de l'ajustement osmotique et de la réponse protéique du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Diplôme d'Etudes Approfondies, Bases de la production végétale, Université de Montpellier II. Sciences et Techniques de Lan ;guedoc / Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
173. Krause, P., Boyle, D. & Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.*, 5, 89-97.
174. Kribaa M. 2002. Effet de la jachère sur les sols de la céréaliculture pluviale des zones semi arides méditerranéennes « Cas des hautes plaines sétifiennes d'Algérie ». Thèse D'Etat, INA, El Harrach, Alger, 174p.
175. Krishnan ,P., Ramakrishnan, B., Rao, K.S. & Dash, R.N. 2009. Simulation Studies to Characterize the Impact of Climate Change on Crop Production and to Identify Strategies for Adaptation and Mitigation. In *Climate Change and Crops* [Singh SN (Ed.)]. Springer, 375 pp.
- L-
176. Laval-Martin, D. & Maziliac, P. 1979. TP et TD de physiologie végétale Ed. Hermann Paris, 338 p.
177. Lawlor, D.W., Day, W., Johnston, A.E., Legg B.J. & 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.
178. Leclerc, J.C. 1988. Ecophysiologie végétale. Editions l'université de Saint Etienne. 350 p.
179. Legates, D. R. & McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.*, 35(1), 233-241.
180. Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. I chelling, freezing, ad high temperature stresses. 2 ed. Academic press. NY. 640 pp.
181. Loague, K. & Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. *J Contam Hydrol*, 7:51 73.
182. López-Castañeda, C. & Richards, R.A. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments II. Phasic development and growth. *Field Crops Res.* 37, 63-75.
183. Loomis, R.S. & Rabbinge, R. Ng. E. 1979. Explanatory models in crop physiology. *Annu Rev Plant Physiol* 30:339-367
- M-
184. Maamri, K. 2011. Stabilité du critère de la discrimination du carbone isotopique en relation avec le poids spécifique de la feuille drapeau chez quelques variétés de blé dur cultivées en milieu semi aride. Mémoire de

- magister. Faculté SNV. UFA, Sétif. 75 p.
185. Maamri, K., Guendouz, A., Moumeni, L. & Hafsi, M. 2018. Aqua-crop module as best tool to estimate water stress in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under semi-arid conditions. *Int. J. Biosci.* 12 (5), 176-185.
 186. Madhava Rao, K.V., Raghavendra, A.S. & Janardhan Reddy, K. 2006. Printed in the Netherlands. Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. *Springer*: 1-14.
 187. Martre, P., Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Zyskowski, R.F., Porter, J.R., & Triboni, E. 2006. Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *Eur. J. Agron.* 25(2): 138–154
 188. Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., & Hoogenboom, G. 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Sci.* 4:41–51.
 189. 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
 190. Meziani, L., Bammoun, A., Hamou, N., Brinis, L. & Monneveux, P. 1993. Essai de définition des caractères d'adaptation du blé dur dans différentes zones agroclimatiques de l'Algérie. In Monneveux, P and Ben Salem, M. (eds). Tolérances la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes. Diversité et amélioration variétale. *les colloques*, 64. 191-203
 191. Mekhlouf, A., Bouzerzour, H. & Dehbi F., 2001. Rythme de développement et variabilité de réponses du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux basses températures. Tentatives de sélection pour la tolérance au gel. In : Procceeding séminaire sur la valorisation des milieux semi-arides. Oum El Bouaghi, 23 : 75-80.
 192. Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Hadj Sahraoui, A. & Harkati, N., 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi- aride. *Sécheresse*. 17(4) : 507-13.
 193. Mekliche Hanifi, L. 1983. Etude agronomique, analyse diallèle et cytogénétique de quatre variétés de blé tendre cultivées en Algérie. Thèse de Magister INA, El Harrach, 150 pages
 194. Merah, O., Monneveux, P., Nachit, M. & Deléens, E. 1999. La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement photosynthétique : application à l'amélioration génétique du blé dur en conditions méditerranéennes. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. 8 (1) : 37,
 195. Merah, O., Deleens, E., Teulat, B. & Monneveux, P. 2001. Productivity and carbon isotope discrimination in durum wheat organs under a Mediterranean climate. *C R Acad. Sci. Paris.* 324 : 51- 57.
 196. Merot, A. & Bergez, J.E. 2010. IRRIGATE: A dynamic integrated model combining a knowledge-based model and mechanistic biophysical models for border irrigation management. *Environmental Modelling and Software* 25 (4) : 421-432
 197. Mogensen, V. O. 1991. Growth rate of grains of barley in relation to drought. *Acta. Agric. Scand.* 41: 345-353.
 198. Mogensen, V. O. & 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.
199. Monneveux, P. 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver ? Amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. 165-186.
 200. Monneveux, P. & Nemmar, M. 1986. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*T. aestivum* L.) et chez le blé dur (*T. durum* L.) : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie* : 6, 583-590.
 201. Monneveux, P. & This, D. 1997. La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficultés : *Sécheresse* ,1(8) : 29-37.
 202. Monneveux, P., Reynolds, M.P., Aguilar, J.G. & Singh, R.P., 2002. Effects of the 7DL-7AJ translocation from *Leghempurum elongatum* on wheat peld and related morpho-physiological traits under different environments. *Plant breeding*. 122 : 379-384.
 203. Moragues, M., Garcí'a del Moral, L.F., Moralejo, M. & 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.
 204. Morgan, J.M. 1992. Adaptation to water deficits in three grain legume species. Mechanisms of turgor maintenance. *Field Crop Res.* 29: 91-106.
 205. Morgan, J.M., Hare, R.A. & Fletcher, R.J., 1986. Genetic variation in osmoregulation in bread and durum wheats and its relationship to grain yield in a range of field environments. *Aust. J. Agric. Res.* 37, 449-457.
 206. Mouhouche, B. & Boulassel, A. 1997. Gestion rationnelle des irrigations de compléments des cultures de légumineuses alimentaires et de céréales. *Recherche Agronomique*, Revue semestrielle N° 01 Octobre 1997. INRA d'Algérie.
 207. Moustafa, M. A, Boersma, L. & Kronstad, W. E. 1996. Response of four spring wheat cultivars to drought stress. *Crop Sci*, 36: 982-986
 208. Mutreja, K.N. 1990. Applied Hydrology, New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- N-
209. Nachit, M.M., Picard, E., Monneveux, P., Labhilili, M., Baum, M. & Rivoal, R. 1998. Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. *Cahiers Agric.*, 7 : 510-515.
 210. Nain, A.S. & Kersebaum, K.Ch. 2007. Calibration and validation of CERES-wheat model for simulating water and nutrients in Germany. In: Kersebaum K Ch *et al.* (Eds.), Modeling Water and Nutrient Dynamics in Soil–Crop Systems. *Springer*, pp. 161–181
 211. Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles, *J Hydrol*, 10: 282-290.
 212. N'diongo, O. 1993. Irrigation de complément du ble: Effet de l'irrigation post-épiaison. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'E.S.I.E.R. 47p.
 213. Nemecek, T., Derron, J.O., Roth, O. & Fischlin, A. 1996. Adaptation of a crop-growth model and its extension by a tuber size function for use in a seed potato forecasting system. *Agric Syst* 52 (4): 419–437.
 214. Nemmar, M. 1980. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé dur (*T durum dsf*) et chez le blé tendre (*T aestivum* L.) : étude l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique. Thèse D.A.A.

- ENSA. Montpellier 63 pp.
215. Nezhadahmadi, A., Prodhon, Z. H. & Faruq, G. 2013. Drought Tolerance in Wheat. *The ScientificWorld Journal*, 10: 1-12
216. Ngetich, K. F, Raes, D., Shisanya, C. A, Mugwe, J., Mucheru-Muna, M., Mugendi, D. N. & Diels, J. 2012. Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya. Third RUFORUM Biennial Meeting, Entebbe, Uganda.
217. Nicholas, M. E. & Turner, N. C. 1993. Use of chemical desiccants and senescing agents to select wheat lines maintaining stable grain size during post-anthesis drought. *Field Crops Res*, 31: 155-171.
- O-
218. Onfaa. Observatoire National des Filières Agricoles et Agro-Alimentaires (MADR). 2016. <http://onfaa.inraa.dz/>
219. Oosterhuis, D. M. & Cartwright, P. M. 1983. Spike Differentiation and floret survival in semi dwarf spring wheat as affected by water stress and photoperiod. *Crop Sci*, 23: 711-716.
220. Ortiz-Monasterio, R.J.I., Dhillon, S.S. & Fischer, R.A., 1994. Date of sowing effects on grain yield and yield components of irrigated spring wheat cultivars and relationships with radiation and temperature in Ludhiana, India. *Field Crops Res*. 37, 169–184.
221. O'toole, J.C. & Cruz R.T., 1980. Response of leaf water potential, stomatal resistance and leaf rolling to water stress. *Plant Physiol*. 51 : 993-997.
222. Oweiss, Th.Y. & Zhang, H. 1998. Water use efficiency : index for optimizing supplemental irrigation of wheat in water scarce areas. *J. Applied Irrigation Science*. 33 : 321-336.
223. Ozturk, A. & Aydin, F. 2004. Effects of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *J. Agron. Crop Sci*. 190, 93–99
- P-
224. Padilla, M. & Oberti, B. 2000. Diet and foods around the Mediterranean. Eds Karthala. Paris (France). 264 p.
225. Palta, J. A., Kobata, T., Turner, N. C. & Fillery, I.R. 1994. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post-anthesis water deficits. *Crop Sci.*, 34: 118-124.
226. Papadakis, J.S. 1932. Ecologie agricole. Eds Jules Duculot. Gembloux. 303 pp.
227. Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science*. 43 : 117 - 120.
Passioura, J.B. 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal*, 88 (5) : 690-694.
228. Paulsen, G.M. & Heysen E.G. 1983. Grain production of winter wheat after spring freeze injury. *Agro. J*. 75 : 105-107.
229. Peterson, C. M., Klepper, B., Pumphrey, F. B. & Rickman, R. W. 1984. Restricted rooting decreases tillering and growth of winter wheat. *Agron J*, 76: 861-863.
230. Porter, J.R., Jamieson P.D., & Wilson, D.R. 1993. Comparison of the wheat simulation models Afrwheat2, Ceres-wheat and Swheat for non-limiting conditions of crop growth. *F. Crop. Res*. 33(1-2): 131–157
231. Prystupa, P., Savin, R. & Slafer, G.A. 2004. Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N × P fertilization in barley. *Field Crops Res*. 90 : 245-254.

-R-

232. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Agron J*, 101 : 438–447.
233. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, D. 2011. AquaCrop – The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual. p. 265
234. Ranieri, R. 2015. Geography of the durum wheat crop. *Pastaria international 6/2015*. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.
235. Rastoin, J.L. & Benabderrazik, E.L. 2014. Céréales et oléagineux au Maghreb. document de l’Institut de prospective économique du monde méditerranéen (*Ipemed*). 136 pages.
236. Rekika, Dj. 1997. Identification et analyse génétique des caractères physiologiques liés au rendement en condition de sécheresse chez le blé dur. Intérêt potentiel des espèces sauvages apparentées pour l’amélioration de ces caractères. Thèse de Doctorat. ENSA de Montpellier. 158 p.
237. Reynolds, M.P., Balota, M., Delgado, M.I.B., Amani, I. & Fischer R.A., 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Aust. J. Plant. Physiology*. 21 : 717- 730.
238. Richards, R. A. & Townley-Smith, T. F. 1987. Variation in leaf area development and its effects and water use, yield and harvest index of droughted wheat. *Austr J Agric Res*, 38: 983-992
239. Richards, R.A., Rebtzke, G.J., Van Herwaarden, A.F., Dugganb, B.L. & Condon, A.G. 1997. Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture*. 36 : 254 - 266.
240. Richards, R.A., Rebetzke, G.J, Condon, A.G & Van Herwaarden, A.F. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci* ; 42 : 111-121.
241. Rickman, R. W., Klepper, B. L. & Peterson, C. M. 1983. Time distribution for describing appearance of specific culms of winter wheat. *Agron J*, 75: 551-556.
242. Ritchie, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. In: Understanding options for agricultural production [Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK (eds)]. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, pp 41–54
243. Rosenzweig, C. & Parry, M.L. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367, 133–138.
244. Rouabhi, A. 2008. Efficacité d’utilisation de l’eau et sélection de variétés de blé dur sous les conditions du climat semi aride. Mémoire de magister. Faculté des sciences. UFA, Sétif. 104 p.
245. Royo, C., Elias, E. & Manthey, F. 2009. Durum Wheat Breeding. In: Carena M. (eds) Cereals. Handbook of Plant Breeding, vol 3. Springer, NewYork, NY

-S-

246. Salazar, O., Wesstrom, I., Youssef, M.A., Wayne Skaggs, R. & Joel, A. 2009. Evaluation of the DRAINMOD-N II model for predicting nitrogen losses in loamy sand under cultivation in southeast Sweden. *Agric. Water Manage*, 96 : 267–281.
247. Salsac, L. & Monneveux, P. 1991. Relation entre la nutrition minérale et la tolérance au déficit hydrique. In : Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediteranean environments. Acevado E., Conesa A.P., Monneveux P. and Srivastva J.P. (eds.). *Colloque*, 55, INRA, Paris, 49-66.
248. Salter, P. J. & Goude, J. E. 1967. Crop responses to water at different stages of growth. *Common Wealth Bureau of Horticultural and Plantation Corps*.

- Research Review No, 2. p. 246.
249. Sassi, K., Abid, G., Jemni, L., Dridi- Al Mohandis, B. & Boubaker, M. 2012. Etude comparative de six varieties de blé dur (*Triticum durum* Desf.) vis-à-vis du stress hydrique. *Journal of Animal & Plant sciences*, 15, 2157-2170.
 450. Savin R. & Slafer G.A. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 116, 1–7.
 251. Semcheddine, N. 2008. Utilisation de la discrimination isotopique du carbone comme critère de sélection du blé dur en relation avec le bilan hydrique. Mémoire de magister. Faculté des sciences. UFA, Sétif. 72 p.
 252. Semcheddine, N. 2015. Evaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno morpho-physiologiques. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Département des Sciences Agronomiques, Faculté SNV, UFA Sétif 1.
 253. Shanahan, J.F., Smith, D.H., & Welsh, J.R. 1984. An analysis of post-anthesis sink-limited winter wheat grain yields under various environments. *Agron. J.*, 76: 611-615.
 254. Siddique, K.H.M., Kirby, E.J.M. & Perry, M.W. 1989. Ear to stem ratio in old and modern wheats: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.* 21, 59–78
 255. Simane, B., Peacock, J.M. & Struik, P.C., 1993. Differences in development plasticity growth rate among drought. Resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Plant and Soil*, 157 : 155-166.
 256. Slafer, G.A. & Andrade, F.H. 1991. Genetic improvement effect on pre-anthesis phenological attributes related to wheat grain yield. *FCR*, 23: 255-263.
 257. Slafer, G.A. & Rawson, H. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 393–426.
 258. Slageren Van, M. W. S. J. M. 1994. *Wild wheats : a monograph of Aegilops L. and Amblyopyrum (Jaub. & Spach) Eig (Poaceae) : a revision of all taxa closely related to wheat, excluding wild Triticum species, with notes on other genera in the tribe Triticcae, especially Triticum*. I.C.A.R.D.A. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University.
 259. Slama, A. 2002. Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. Thèse de doctorat en biologie, faculté des sciences de Tunis.
 260. Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M. & Zid, B. 2005. Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse* ; 16 (3) : 225-9.
 261. Soussana, J.F., Graux, A.I. & Tubiello, F.N. 2010 Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *J Exp Bot* 61: 2217–2228.
 261. Splinter, W.E. 1974. Modeling of plant growth for yield prediction. *Agric Meteorol* 14, 243– 253.
 262. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. & Fereres, E. 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426- 437.
 263. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. & Raes, D. 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 66. Rome, Italy. 500 p.

264. Stöckle, C.O., Donatelli, M. & Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model, *Euro. J. Agron.* 18, 289–307.
265. Sullivian, C.Y. & Ross W.M. 1979. Selecting for drought and heat resistance in grain sorghum. In: Stress physiology in crop planted, H. Mussel and R.C. Staples, Eds, A John Willey and Sons Publication: 263-281.
266. Sutka, J. 1994. Genetic control of frost tolerance in wheat. *Euphytica* 77 : 277-282.
267. Swain, D., Chandrabaskar, B., Krishnan, P., Rao, K.S., Nayak, S.K. & Dash, R.N. 2006. Variation in yield, N uptake and N use efficiency of medium and late duration rice varieties. *J Agric Sci (Cambridge)* 144(1):69–83
268. Swain, D., Heathi, S., Chandrabaskar, B., Krishnan, P., Rao, K.S., Nayak, S.K. & Dash, R.N. 2007. Developing ORYZA 1N for medium- and long-duration rice: Variety selection under non-water-stress conditions. *Agro J (US)* 99:428–440

-T-

269. Tahri, E., Belabed, A., & Sadki, K. 1997. Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Bulletin de l'Institut Scientifique*. Rebat, 21: 81-89 .
270. Talbert, P.B., Adler, H.T., Parks, D.W. & Comai, L. 1995. The REVOLUTA gene is necessary for limiting cell divisions in the leaves and stems of *Arabidopsis thaliana*. *Development*, 121: 2723–2735.
271. Tardieu, F. & Dreyer E. 1997. Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. edited by INRA Éditions. Institut National de Recherche Agronomique. pp. 41-5.
272. Thorne, G.N. & Wood, D.W. 1987. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. *Annals of Botany*.
273. Thornley, J.H.M. 2001. Modelling grassland ecosystems. In: Proceedings of the 19th International Grassland Congress [Mattos WRS, dailva SC (Eds.)]. São Paulo, Brazil, 1029–1035
274. Thornton, P.K., Bowen, W.T., Ravelo, A.C, Wilkens, P.W., Farmer, G., Brock, J. & Brink, J.E. 1997. Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modeling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agric Forest Meteorol* 83 (1–2): 95–112
275. Todorovic M., Albrizio, R. & Zivotic, L. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation, of sunflower growth under different water regimes. *Agron. J.*, 101: 509-521.
276. Triboï, E. 1990. Model d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre (*Triticum aestivum*) en thell. *Agronomie*, 1: 191-200.
277. Tunio, S.D., Korejo, M.N., Jarwar, A.D. & Waggan, M.R. 2006. Studies on indogenous and exotic weed competition in wheat. *Pak J Agri Biol*, 5(4): 1-8.
278. Turner, N.C. 1986. Adaptation to water deficit: a changing perspective. *Aust J Plant Physiol*; 13 :175-90.
279. Turner, N.C.1997. Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy* 58: 293 338.
280. Turner, N.C., Wright, GC & Siddique, K.H.M., 2001. Adaptation of grain legume to water-limited environments. *Adv Agron* ; 71 : 193-231.
281. Tyree, M. T., & Jarvis, P. G., 1982. Water in tissues and cells. In Encyclopedia of plant physiology, Volume 12B. Physiological plant ecology II—Water

relations and carbon assimilation. Eds O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond and H. Ziegler. Springer-Verlag, Berlin. Pp. 35-77.

-U-

282. USDA Foreign Agricultural Service, 2014. Morocco: grain and feed update (10/22/2014). <http://www.fas.usda.gov/data/moroccograinsand-feed-update>. Accessed 8 June 2015

-V-

283. Vachon, M., Beaulieu-Prévost, D.B., Ouellette, A. & Achille, M.A. 2005. Analyse de classification hiérarchique et qualité de vie. *Tut Quant Meth Psychol.* ; 1(1): 25–30.
284. Van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A., van der Wal, T., Wien, J.-E. & Wolf, J. 2008. Integrated assessment of agricultural systems—a component based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96:150–165
285. Van Oosterom, E.J., Ceccarelli, S. & Peacock, J.M. 1993. Yield response of barley to rainfall and temperature in Mediterranean environments. *Journal of Agricultural Sciences Cambridge* 121 : 304-313
286. Vargas, M., Crossa, J., Van Eeuwijk, FA., Ramirez, ME. & Sayre, K. 1999. Using partial least squares regression, factorial regression and AMMI models for interpreting genotype by environment interaction. *Crop Sci.* 39: 955-967.
287. Vasquez-Tello, A., Zuily-Fodil, Y., Pham Thi, A. T. & Vieira Da Silva, J. B. 1990. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in Phaseolus and Vigna species. *J Exp Bot*, 41 : 827-32.
288. Vossen, P. & Rijks, D. 1995. Early crop yield assessment of the E.U. countries: the system implemented by the Joint Research Centre. EUR 16318, Publication of the Office for Official Publications of the EC, Luxembourg

-W-

289. Wallach, D. 2006. Evaluating Crop Models. In: Wallach, D., Makowski, D. and Jones, J.W., Eds., Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications, Elsevier, Amsterdam, 11-54
290. Wang, E. L. & Engel, T. 2002. Simulation of growth, water and nitrogen uptake of a wheat crop using the SPASS model. *Environmental Modelling & Software*, 17, 387–402
291. Wang, G.Z., Miyashita, N.T. & Tsunewaki, K. 1997. Plasmon analyses of Triticum (wheat) and Aegilops: PCR-single-strand conformational polymorphism (PCR SSCP) analyses of organellar DNA. *PNAS*, 94: 14570-14577.
292. Wardlaw, I.F. 2002. Interaction between drought and high temperature during grain filling in wheat in controlled environments. *Annals of Botany.* 90 469-476.
293. Waringer, A., Heilmeyer, H., Hartung, W. & Schultze, E.D., 1990. Daily and seasonal courses of leaf conductance and abscisic acid in the sylem sap of almond trees (*Prunus dulcis M.*) under desert conditions. *New Phytol.* 116 : 581-587.
294. Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R. & Rayner, J.H. 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J Agric Sci Camb*, 102, 371-382
295. Welch, C., Marschan-Piekkari, R., Penttinen, H., & Tahvanainen, M. 2002.

- Corporate elites as informants in qualitative international business research. *International Business Review*, 11(5), pp. 611-628.
296. White, J.W. & Hoogenboom, G. 2010. Crop Response to climate: Ecophysiological Models. In climate change and food security. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 197p
297. Willmott, C. J. 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. In Spatial Statistics and Models. *Springer*. 443-460
298. Willmott, C. J., Akleson, G. S., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., Odonnell, J. & Rowe, C. M. 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *J Geophys Res*, 90: 8995 9005.
299. Wolf, J. 1993. Effects of climate change on wheat and maize production potential in the EC. In: Kenny, G.J., Harrison, P.A., Parry, M.L. (Eds.), The Effect of Climate Change on Agricultural and Horticultural Potential in Europe. Research Report No. 2, Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford, pp. 93–120.
- Y-**
300. Yaklef, N. 2001. Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum Dref*). Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri, Constantine. 146 P.
301. Yun, J.I. 2003. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop- growth modeling. *Agric Syst* 77 (1): 23–38.
- Z-**
302. Zadoks J.C., Chang, T.T. & Konzak, C.F. 1974. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals, *Weed Research* 14:415-421.
303. Zeleke, K. T. & Wade, L. J. 2012. Evapotranspiration Estimation Using Soil Water Balance, Weather and Crop Data, Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling, Dr. Ayse Irmak (Ed.), 19pp.

ANNEXES

Annexe 01 : Résultats du test de l'analyse de variance (ANOVA) des variables étudiées .

<i>NOMBRE D'EPIS /M² (NE /m²)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	2071470.871	517867.72	2864.1744	.0000 ***
Génotype	6	23932.07004	22.060209	3988.6783	.0000 ***
Année * Génotype	24	159141.0554	6630.8773	36.673436	.0000 ***
Error	70	12656.6108	180.80873<-		
Total	104	2267200.607			
<i>NOMBRE DE GRAINS /M² (NG/m²)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	1295734132	3.23934e8	252887.63	.0000 ***
Génotype	6	148192366.3	24698728	19281.741	.0000 ***
Année * Génotype	24	304386301.8	12682763	9901.1476	.0000 ***
Error	70	89665.705	1280.9386<-		
Total	104	1748402466			
<i>POIDS DE MILLE GRAINS (PMG)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	3430.647651	857.66191	186.74471	.0000 ***
Génotype	6	325.3144114	54.219069	11.805496	.0000 ***
Année * Génotype	24	1148.233389	47.843058	10.417203	.0000 ***
Error	70	321.4888	4.5926971<-		
Total	104	5225.684251			
<i>RENDEMENT EN GRAIN (RDT)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	29974.71369	7493.6784	10044.068	.0000 ***
Génotype	6	999.3338229	166.55564	6 223.2409	.0000 ***
Année * Génotype	24	6790.247434	282.92698	379.21801	.0000 ***
Error	70	52.2256	0.74608<-		
Total	104	37816.52054			
<i>BIOMASSE AERIENNE (BIO)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	59455.27881	14863.82	10350.314	.0000 ***
Génotype	6	6793.744063	1132.2907	788.46247	.0000 ***
Année * Génotype	24	15162.18099	631.75754	439.91982	.0000 ***
Error	70	100.5252	1.4360743<-		
Total	104	81511.72906			
<i>INDICE DE RECOLTE (IR)</i>					
Source	df	Type III SS	MS	F	P
Main Effects					
Année	4	2378.724137	594.68103	316.86	.0000 ***
Génotype	6	3957.562406	659.59373	351.44701	.0000 ***
Année * Génotype	24	1986.890023	82.787084	44.1109	.0000 ***
Error	70	131.3756	1.8767943<-		
Total	104	8454.552166			



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Aqua-crop module as best tool to estimate water stress in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under semi-arid conditions

K. Maamri¹, A. Guendouz², L. Moumeni³, M. Hafsi³

¹Department of Agronomy, Mohamed El Bachir El Ibrahimi University of Bordj Bou Arréridj, Algeria

²National Institute of the Agronomic Research of Algeria, Research Unit of Setif (INRAA), Algeria

³Department of Agronomy, Ferhat ABBAS University of Setif, Algeria

Key words: Aqua crop model, Durum wheat, Semi-arid conditions, Water stress, Grain yield

<http://dx.doi.org/10.12692/ijb/12.5.176-185>

Article published on May 30, 2018

Abstract

Simulation models that clarify the effects of water on crop yield are useful tools for improving farm level water management and optimizing water use efficiency. FAO recently developed a water-driven model for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations with limited sophistication. The objective of this study is to validate the Aqua-Crop model for its ability to simulate wheat (*Triticum durum* Desf.) performance under semi-arid conditions in East of Algeria. The Aqua-Crop model was evaluated with field experimental data collected during five cropping seasons (2010-2016) where total water stress ranged between 20% at Heading-Maturity stage to 66% at Heading-Maturity stage. The results of this study proved the efficiency of the Aqua Crop model to quantify the water stress. The results of reliability indices such as Root Mean Square Error (RMSE), Average Absolute Error (AAE), Index of agreement (d), and Prediction error (Pe) were 3.17, 2.96, 0.54 and 5.41% respectively for grain yield; and 4.29, 4.03, 0.38 and 6.25% respectively for final above-ground biomass. The Aqua-Crop model was able to accurately simulate harvest index giving a d = 0.69, RMSE and AAE of 14.41 and 13.65%, respectively. The Aqua-Crop model can adequately quantify water stress and can be used to explore management options to improve wheat water productivity. Its simplicity due to its required minimum input data, which are readily available or can easily be collected, can make it user-friendly for users.

* Corresponding Author: K. Maamri ✉ khelifa.maamri@gmail.com

Introduction

Demand for cereal is predicted to increase in the future as the global population increases. With the world's population estimated to reach 9.6 billion by 2050, wheat production will have a crucial bearing on food security and the global economy in the coming decades (USDA Foreign Agricultural Service 2014). Wheat is one of the most important cereal crops in the world, which is grown both in arid and semiarid regions of the world (Akbar *et al.*, 2001; Tunio *et al.*, 2006). Current estimates indicate that 25% of the world's agricultural land is now affected by drought stress. It can be said that drought stress is one of the most devastating environmental stresses that depress wheat yield productivity in many parts of the world. (Ahmad *et al.*, 2003).

Crops demonstrate various morphological, physiological, biochemical, and molecular responses to tackle drought stress. Plants' vegetative and reproductive stages are intensively influenced by drought stress (Nezhadahmadi *et al.*, 2013). The crop water need is related to moisture sensitive periods. Salter and Goude (1967) defined such periods as "certain development phases in which the plant is, or appeared by its observed response, to be more sensitive to moisture conditions than at other stages of development". If moisture sensitive periods could be identified for wheat crop under field conditions, it would have an important implication for irrigation practices. Efficient and purposeful utilization of water is, therefore, important under water shortage conditions. FAO has developed a yield-response to water model, Aqua-Crop, a crop water productivity simulation model resulting from the revision of the FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33- Yield Response to Water (Doorenbos and Kassam, 1979). Aqua-Crop is for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations (Steduto *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009). It simulates crop yield response to water, and is particularly suited to address conditions where water is a key limiting factor in crop production. For parameterization calibration, one changes model parameters and even coding in order to obtain

accurate prediction versus observed data. On the other hand, validation is the process whereby the model is run against independent data, without any modification of model parameters or code (Nain and Kersebaum, 2007; Andarzian *et al.*, 2008; Salazar *et al.*, 2009). The objective of the study is the validation of Aquacrop model and evaluation of its performance to quantify the water stress under semi-arid conditions in East of Algeria using four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties chosen for their reputed differences in yield performance and water stress tolerance (Oued Zenati, Bousselam, Altar and Mexicali 75).

Materials and methods

Aquacrop Model

Estimating attainable yield under water-limiting conditions will remain central in arid, semi-arid and drought-prone environments. To address this need, FAO has developed a yield-response to water model, Aqua-Crop, a crop water productivity simulation model resulting from the revision of the FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 –Yield Response to Water (Doorenbos and Kassam, 1979). For over two decades, this paper has been a key reference for estimating the yield response of field, vegetable and tree crops to water. Similarly to many other crop-growth models, Aqua-Crop further develops a structure (sub-model components) that includes: the soil, with its water balance; the crop, with its development, growth and yield; the atmosphere, with its thermal regime, rainfall, evaporative demand and carbon dioxide concentration (CO₂); and the management, with its major agronomic practice such as irrigation and fertilization. Simulation runs of Aqua-Crop are executed with daily time steps, using either calendar days or growing degree days. Several features distinguish Aqua-Crop from other crop growth models achieving a new level of simplicity, robustness and accuracy (Steduto *et al.*, 2009). The FAO crop model, Aqua-Crop (Steduto *et al.*, 2009), simulates attainable yields of major herbaceous crops as a function of water consumption under rainfed, supplemental, deficit, and full irrigation conditions.

The growth engine of Aqua-Crop is water-driven, in that transpiration is calculated first and translated into biomass using a conservative, crop-specific parameter (Geerts *et al.*, 2009), the biomass water productivity, normalized for atmospheric evaporative demand and air CO₂ concentration. The normalization is to make Aqua-Crop applicable to diverse locations and seasons. Simulations are performed on thermal time, but can be on calendar time, in daily time-steps.

The model uses canopy ground cover instead of leaf area index (LAI) as the basis to calculate transpiration and to separate soil evaporation from transpiration. Crop yield is calculated as the product of above-ground dry biomass and harvest index (HI). Starting at flowering, HI increases linearly with time after a lag phase, until near physiological maturity. Other than for the yield, there is no biomass partitioning into the various organs. Crop responses to water deficits are simulated with four modifiers that are functions of fractional available soil water modulated by evaporative demand, based on the differential sensitivity to water stress of four key plant processes: canopy expansion, stomatal control of transpiration, canopy senescence, and HI. The HI can be modified negatively or positively, depending on stress level, timing and stress duration. Aqua-Crop uses a relatively small number of parameters (explicit and mostly intuitive) (Steduto *et al.*, 2009).

Estimation of ETo

The ETo was accounted with the use of ETo calculator (Version 3, January 2009; Raes *et al.*, 2009). The Penman-Monteith approach was utilized for ETo computation. This method is the most general and widely used equation for calculating daily reference ET, that is recommended by FAO (Allen *et al.*, 1998). The inputs for the calculator [maximum air temperature (Tmax), minimum air temperature (Tmin), maximum relative humidity (RHmax), minimum relative humidity (RHmin), sunshine hours (n/N) and wind speed at a height of 2 m (u₂) based on long-term weather data (1979 to 2017)] were collected from Setif meteorological station.

Performance Evaluation of Aquacrop

Evaluation is an important step of model verification. It involves a comparison between independent field measurements (data) and output created by the model. Different statistic indices including Average Absolute Error (AAE), root mean square error (RMSE) and agreement (D-index) were employed for comparison of simulated against observed data.

For the performance evaluation of Aqua-Crop, following notations were used:

S_i = simulated value

O_i = observed value,

N = number of observations

MS = mean of simulated value,

MO = mean of observed value.

Average Absolute Error (AAE)

Absolute percentage error between simulated and observed values may be calculated using following equation (Loague and Green, 1991):

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

Root Mean Square Error (RMSE)

Root mean square error (RMSE) is calculated as follows (Loague and Green, 1991):

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

The RMSE represents a measure of the overall, or mean, deviation between observed and simulated values, that is, a synthetic indicator of the absolute model uncertainty. In fact, it takes the same units of the variable being simulated, and therefore the closer the value is to zero, the better the model simulation performance.

Index of agreement (d)

The index of agreement (d) was calculated using the Willmott (1985) equation:

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

The index of agreement is a measure of relative error in model estimates. It is a dimensionless number and ranges from 0 to 1.0, where 0 describes complete

disagreement and 1.0 indicates that the estimated and observed values are identical.

Prediction error (Pe)

Model performance was evaluated using the following statistical parameter prediction error (Pe) (Nash and Sutcliffe, 1970), given by:

$$Pe = \frac{(Si - Oi)}{Oi} \times 100$$

Correlation coefficient (r)

The correlation coefficient is an indicator of degree of closeness between observed values and model estimated values. The observed and simulated values are found to be better correlated as the correlation coefficient approaches to 1. If observed and predicted values are completely independent i.e., they are uncorrelated then r will be zero. The correlation coefficient was estimated by the following equation:

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

Results and discussion

Quantification of the water stress

1 Water stress during first stage (Sowing-Emergence)

During this stage and at all cropping seasons (2010-2016) water stress values ranged from 0.23 at fourth cropping season (2014/2015) to 0.74 at fifth cropping season (2015/2016), with a mean of 0.45 for all cropping seasons (Table 1). Leaf expansion is most sensitive to water stress (Acevedo *et al.*, 1971) and leaf growth can be drastically reduced at leaf water potentials of -0.7 to -1.2 MPa (Eastham *et al.*, 1984). Tillering is also very sensitive to water stress being almost halved if conditions are dry enough (Peterson *et al.*, 1984; Rickman *et al.*, 1983). As a result, leaf area index development is the most affected physiological process during this stage. Water deficit just before flower initiation may also decrease the number of spikelet primordia at this stage (Oosterhuis and Cartwright, 1983). Water stress may affect the growth of wheat, but the effects are small when stress occurs in the early stages than when it occurs in the late vegetative phase and during grain filling (Abayomi and Wright, 1999).

Water stress during second stage (Emergence-Heading)

As shown in Table 1, water stress varied between 0.09 at third cropping season and 0.42 at fifth cropping season. This stage is therefore a period of very active plant growth. Water stress during this stage decreases spikelets per spike of fertile tillers (Hochman, 1982; Moustafa *et al.*, 1996) and causes death of the distal and basal florets of the spikes (Oosterhuis and Cartwright, 1983). It follows that mild to moderate water deficits during this period will decrease cell growth and leaf area with consequent decrease of photosynthesis per unit area due to partial stomata closure (Acevedo, 1991).

Water stress during third stage (Heading-Maturity)

During this stage and at all cropping seasons (2010-2016) water stress values ranged from 0.41 to 0.97. The highest water stress registered during fifth cropping season (2015/2016) with total mean of 0.66 (Table1). Wheat plant growth (roots, leaves, stems and ears) continues up to approximately 10 days after anthesis. Water stress may affect the growth of wheat, but the effects are small when stress occurs in the early stages than when it occurs in the late vegetative phase and during grain filling (Abayomi and Wright, 1999). Water deficit close to anthesis accelerates development (Simane *et al.*, 1993); the accumulation of soluble carbohydrates in the stem occurring between anthesis and the linear phase of grain growth is decreased (Nicholas and Turner, 1993).

The remobilization of pre-anthesis assimilates to the grain becomes very important as photosynthesis is decreased by water stress and total non-structural carbohydrates from wheat leaves and stems (particularly fructans and sucrose) significantly contribute to grain growth (Bidinger *et al.*, 1977; Richards and Townley-Smith, 1987; Kiniry, 1993; Palta *et al.*, 1994).

Water stress imposed during later stages might additionally cause a reduction in number of kernels/ear and kernel weight (Gupta *et al.*, 2001; Dencic *et al.*, 2000).

Direct effect of water stress on GY and TKW

As shown in Fig. 1, water stress affects negatively grain yield and thousand kernels weight especially in the second (2011-2012) and fifth cropping season (2015-2016). Ashraf (1998), reported that water stress at anthesis reduces pollination and thus less number of grains are formed per spike which results in the reduction of grain yield. Moisture stress is known to

reduce biomass, tillering ability, grains per spike and grain size at any stage when it occurs, due to reduction in radiation use efficiency. So, the overall effect of moisture stress depends on intensity and length of stress (Bukhat, 2005). Water stress imposed during later stages might additionally cause a reduction in number of kernels/ear and kernel weight (Gupta *et al.*, 2001; Dencic *et al.*, 2000).

Table 1. Water stress variation depending on stages during five cropping seasons (2010-2016).

	Stages	Days	ETa	ETx	Water stress
Cropping season 2010/2011	Sowing-Emergence	38,75	53,38	33,43	0,37
	Emergence-Heading	159,25	329,38	263,63	0,2
	Heading-Maturity	189,25	170,13	99,8	0,41
	Stages	Days	ETa	ETc	Water stress
Cropping season 2011/2012	Sowing-Emergence	38,75	46,7	25,8	0,45
	Emergence-Heading	159,25	318,2	261,8	0,17
	Heading-Maturity	189,25	201,875	51,55	0,74
	Stages	Days	ETa	ETc	Water stress
Cropping season 2012/2013	Sowing-Emergence	38,75	58,78	31,08	0,47
	Emergence-Heading	159,25	362,38	330,93	0,09
	Heading-Maturity	189,25	171,78	77,98	0,54
	Stages	Days	ETa	ETc	Water stress
Cropping season 2014/2015	Sowing-Emergence	38,75	47,75	36,73	0,23
	Emergence-Heading	164,75	300,33	258,85	0,13
	Heading-Maturity	190,75	216,88	74,70	0,65
	Stages	Days	ETa	ETc	Water stress
Cropping season 2015/2016	Sowing-Emergence	27,75	53,75	13,65	0,74
	Emergence-Heading	159,00	126,90	72,20	0,42
	Heading-Maturity	185,00	193,25	5,21	0,97
	Stages	Days	ETa	ETc	Water stress
Mean of five seasons	Sowing-Emergence	36,55	52,07	28,14	0,45
	Emergence-Heading	160,30	287,44	237,48	0,20
	Heading-Maturity	188,70	190,78	61,85	0,66

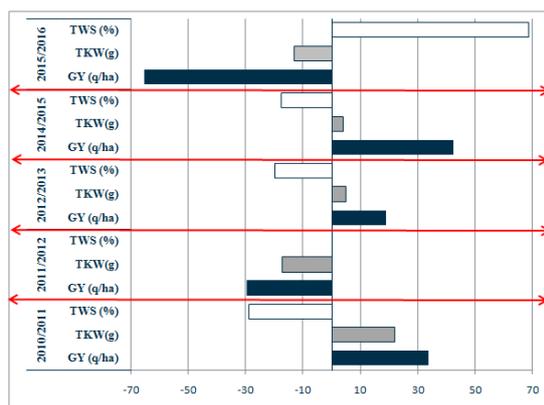


Fig. 1. Deviation from the mean values of Grain yield (GY) thousand kernels weight(TKW) and total water stress (TWS) during five cropping seasons (2010-2016).

Evaluation of the Aqua-Crop model

Grain yield (GY)

Simulation results for all seasons and all traits are presented in Table 2. Fig. 2A shows the relationship

between observed and simulated grain yield for all seasons. Observed and simulated grain yield gives a correlation $r = 0.30$ a slope of 0.41 and a D of 0.54 (Table 2) indicating that the model explained satisfactorily the relationship between observed and modeled wheat grain yield. Araya *et al.* (2010) reported R^2 values > 0.80 when simulating barley aboveground biomass and grain yield using Aqua-Crop. The values of RMSE and AAE are 1.86 and 1.77 ton ha⁻¹, respectively (Table 2).

Overall the difference between the simulated and observed grain yield was 0.20 ton ha⁻¹ indicating that the model overestimated the grain yield by 5.41%. Araya *et al.* (2010) used Aqua-Crop to simulate barley grain yield and reported that the simulated grain yield deviated from the observed yield with a range of 13% to 15%. Ngetich *et al.* (2012) indicated that the grain yields

were slightly underestimated in the long rains season and the reverse was true for the short rains seasons. Andarzian *et al.* (2011) found that the calculated model evaluation criteria between simulated and measured yield were RMSE = 0.27 t

ha⁻¹, D-index = 0.97 and R² = 0.95; they conclude that the Aqua-Crop model could very well predict top-weight biomass and grain yield of wheat in the central region of Iran.

Table 2. Statistical indices derived for evaluating the performance of Aqua-Crop model in predicting grain yield, biomass and harvest index.

		Observed	Simulated	AAE	RMSE	d	Pe (± %)
2010/2011	GY	5,57	6,78	1,21	1,22	0,27	21,72
	Bio	11,25	13,6	2,35	2,41	0,3	20,89
	HI	49,77	49,9	2,04	2,63	0,99	0,26
2011/2012	GY	2,94	5,49	2,55	2,58	0,95	86,73
	Bio	7,69	12,34	4,65	4,66	0,06	60,47
	HI	38,41	44,45	6,03	8,04	0,98	15,73
2012/2013	GY	4,96	6,52	1,57	1,85	0,43	31,45
	Bio	12,71	13,77	1,61	2,42	0,42	8,34
	HI	39,44	47,38	7,94	8,85	0,6	20,13
2014/2015	GY	5,89	1,46	4,43	4,6	0,65	-75,21
	Bio	14,92	11,12	3,8	3,8	0,66	-25,47
	HI	39,39	13,11	26,28	26,34	0,6	-66,72
2015/2016	GY	1,45	1,68	5,05	5,64	0,4	16,24
	Bio	13,16	12,63	7,74	8,2	0,48	-4,01
	HI	39,29	13,33	25,96	26,2	0,3	-66,07
Over all years	GY	4,1614	4,3864	2,962	3,178	0,54	5,41
	Bio	11,946	12,6924	4,03	4,298	0,384	6,25
	HI	41,26	33,634	13,65	14,412	0,694	-18,48

AAE: Average Absolute Error, RMSE: Root Mean Square Error, d: Index of agreement and Pe: Prediction error.

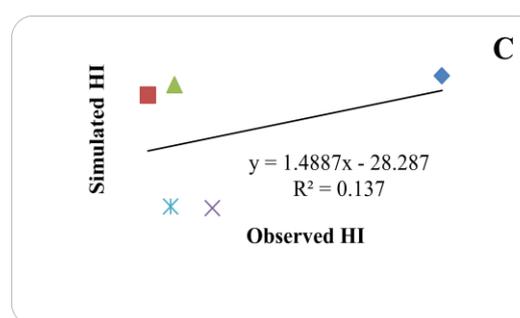
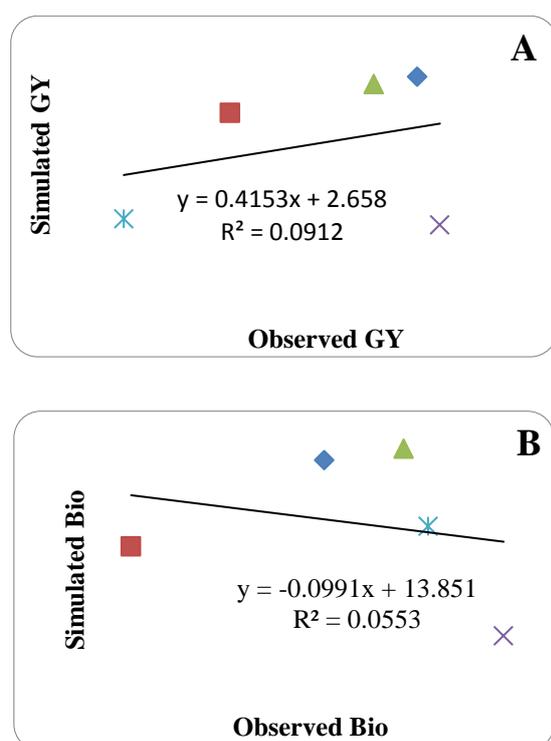


Fig. 2. Linear relationship between observed and simulated Grain yield (A), Biomass (B) and Harvest index (C) for all growing seasons.

Final above-ground biomass (Bio)

There was generally a moderate agreement between model predictions and measured biomass data with a slope of 0.1, a D of 0.38 and r of -0.23. The student t-test showed that the simulated biomass was not significantly different ($p = 0.54$) from the observed biomass with RMSE and AAE of 4.29 and 4.03 ton ha⁻¹,

respectively (Table 2, Fig. 2B). These RMSE and AAE values when expressed as percent of average observed grain yield were 33.91% and 33.94%, respectively. Andarzian *et al.* (2011) mentioned that the calculated values of statistic indices of final above-ground biomass, RMSE, normalized RMSE, D-index, and R^2 were 0.6 t ha⁻¹, 4.4%, 0.97 and 0.95, respectively. Overall the difference between the simulated and observed biomass was 0.80 ton ha⁻¹ indicating that the model overestimated the biomass by 6.25%, but the student's t-test showed that the simulated biomass was not significantly different from the observed biomass. Ngetich *et al.* (2012) shows a good correlation between observed and simulated of both dry final aboveground biomass and grain yields combined for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya; and there was a good fit between the simulated aboveground biomass and grain yield agreed well with their corresponding observed data for all treatments during successful seasons. Zeleke *et al.* (2011) used Aqua-Crop to simulate both total biomass and grain yield for canola (*B. napus* L.) and reported that the difference between observed and simulated values was <10%. Meanwhile, Todorovic *et al.* (2009) when assessing the ability of three models (Aqua-Crop, Crop Syst and WOFOST) to simulate sunflower growth reported that Aqua-Crop overestimated sunflower yield by 1.2%, while Crop Syst and WOFOST underestimated yield by 4.6% and 0.3%, respectively.

The authors concluded that although Aqua-Crop requires less input information compared to the other two models, it performed similarly to the other two models in modeling both total biomass and grain yield.

Harvest Index (HI)

In Aqua-Crop, harvest index (HI) is simulated by a linear increase with time (Steduto *et al.*, 2009). Observed and simulated harvest index correlated well giving a slope of 1.48 and a D of 0.69 (Table 2, Fig. 2C). The student's t-test showed that the simulated harvest index was not significantly different ($p = 0.38$) from the observed harvest index with RMSE and AAE of 14.41 and 13.65%, respectively and the model underestimated the biomass by -18.48% (Table 2).

Harvest index in treatments with nearly optimal water condition (eight irrigations) increased with time and reached the reference level. But it did not increase in rainfed treatments because it was stopped by water stress. Aggarwal *et al.* (1986) found similar HI trend in wheat with irrigated treatments. The adjustment of harvest index to water stress depends on the timing and extent of water stress (Steduto *et al.*, 2009). Adjustments for pollination failure, for inhibition of stomata, for reduction in green canopy duration, for pre-flowering stress were taken into account in the simulation.

Conclusions

The results of this study proved the efficiency of the Aqua-Crop model to quantify the water stress. Total water stress during the five cropping seasons (2010-2016) ranged between 0.2 (20%) at Emergence-Heading stage to 0.66 (66%) at Heading-Maturity stage. As illustrated in Fig. 1, and during fifth cropping season (2015/2016) total water stress (68.5%) severely affected grain yield and thousand kernels weight (-65.3 and -13.12% respectively).

The fourth cropping season (2014/2015) considered as the favorable season compared with the other season. Concerning the evaluation of the Aqua-Crop model, results showed that durum wheat grain yield, Biomass and Harvest index can be simulated with relative accuracy using Aqua-Crop (v3.0). Overall, the agreement between simulated and observed wheat grain yield was satisfactory with $D = 0.54$, RMSE and AAE of 3.18 and 2.96 ton ha⁻¹, respectively. Regarding final above-ground biomass comparison of simulated to observed values for all growing seasons resulted in a $D = 0.38$, RMSE and AAE of 4.29 and 4.03 ton ha⁻¹, respectively. In addition, observed and simulated harvest index gives a $D = 0.69$, RMSE and AAE of 14.41 and 13.65%, respectively. Aqua-Crop's high reliability for the simulations of grain and biomass yield implies that, when properly calibrated, it can be used in developing strategies for improvement of field management decisions. As such, Aqua-Crop is recommended for applications under different agro-climatic conditions.

References

- Abayomi Y, Wright D.** 1999. Effects of water stress on growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Tropical Agriculture* **76**, 120-125.
- Acevedo E, Harris H, Cooper PJM.** 1991. Crop architecture and water use efficiency in Mediterranean environments. In *Soil and Crop Management for Improved Water Use Efficiency in Rainfed Areas*, H. Harris, P.J.M. Cooper and M. Pala, eds. p.106-118. ICARDA, Syria
- Acevedo E, Hsiao TC, Henderson DW.** 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiology* **48**, 631-636.
- Aggarwal PK, Singh AK, Chaturvedi GS, Sinha SK.** 1986. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil-water environment. II. Evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and grain yield. *Field crops research* **13**, 301-315.
- Ahmad R, Qadir S, Ahmad N, Shah KH.** 2003. Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions. *International Journal of Agriculture and Biology* **5**, 7-9.
- Akbar M, Muhammad T, Tayyab J, Muhammad A.** 2001. Evaluation of exotic wheat germplasm for seed yield and its components under rainfed conditions. *Sarhad Journal of Agriculture* **17(4)**, 511-513.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M.** 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome, FAO.
- Andarzian B, Bakhshandeh AM, Bannayan M, Emam G, Fathi G, Alami Saeed G.** 2008. Wheat Pot: a simple model for spring wheat yield potential using monthly weather data. *Biosystems Engineering* **99**, 487-495.
- Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, Mazraeh H, Barati ME, Barati MA, Rahnema A.** 2011. Validation and testing of the Aquacrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* **100**, 1-8.
- Araya A, Habtub S, Hadguc KM, Kebedea A, Dejene T.** 2010. Test of Aqua Crop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* **97**, 1838-1846.
- Ashraf MY.** 1998. Yield and yield components response of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under different soil water deficit conditions. *Acta Agronomica Hungarica* **46**, 45-51.
- Bidinger FR, Musgrave RB, Fischer RA.** 1977. Contribution of stored pre-anthesis assimilates to grain yield in wheat and barley. *Nature* **270**, 431-433.
- Bukhat NM.** 2005. Studies in yield and yield associated traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought conditions. M.Sc Thesis Department of Agronomy. Sindh Agriculture University, Tandojam, Pakistan.
- Dencic S, Kastori R, Kobiljski B, Duggan B.** 2000. Evaporation of grain yield and its components in wheat cultivars and land races under near optimal and drought conditions. *Euphytica* **1**, 43-52.
- Doorenbos J, Kassam AH.** 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper n. 33*. FAO, Rome, Italy 193pp.
- Eastham J, Osterhuis DM, Walker S.** 1984. Leaf water and turgor potential threshold values for leaf growth of wheat. *Agronomy journal* **76**, 841-847.
- Geerts S, Raes D, Gracia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza j, Huanca R, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V, Steduto P.** 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy journal* **101**, 499-508.

- Gupta N K, Gupta S, Kumar A.** 2001. Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield in wheat cultivars at different growth stages. *Agronomy journal* **86**, 1437-1439.
- Hochman ZVI.** 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field crops research* **5**, 55-67.
- Hsiao TC, Heng LK, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E.** 2009. Aqua-Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy journal* **101**, 448-459.
- Kiniry JR.** 1993. Nonstructural carbohydrate utilisation by wheat shaded during grain growth. *Agronomy journal* **85**, 844-849.
- Loague K, Green RE.** 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* **7**, 51-73.
- Moustafa MA, Boersma L, Kronstad WE.** 1996. Response of four spring wheat cultivars to drought stress. *Crop Science* **36**, 982-986.
- Nain AS, Kersebaum KCh.** 2007. Calibration and validation of CERES-wheat model for simulating water and nutrients in Germany. In: Kersebaum K Ch *et al.* (Eds.), *Modeling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems*. Springer pp. 161-181.
- Nash JE, Sutcliffe JV.** 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles, *Journal of Hydrology* **10**, 282-290.
- Nezhadahmadi A, Proadhan ZH, Faruq G.** 2013. Drought Tolerance in Wheat. *The Scientific World Journal* **10**, 1-12.
- Ngetich K F, Raes D, Shisanya C A, Mugwe J, Mucheru-Muna M, Mugendi DN, Diels J.** 2012. Calibration and validation of Aqua Crop model for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya. Third RUFORUM Biennial Meeting, Entebbe, Uganda.
- Nicholas ME, Turner NC.** 1993. Use of chemical desiccants and senescing agents to select wheat lines maintaining stable grain size during post-anthesis drought. *Field crops research* **31**, 155-171.
- Oosterhuis DM, Cartwright PM.** 1983. Spike Differentiation and floret survival in semi dwarf spring wheat as affected by water stress and photoperiod. *Crop Science*, **23**, 711-716.
- Palta JA, Kobata T, Turner NC, Fillery IR.** 1994. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post-anthesis water deficits. *Crop Science* **34**, 118-124.
- Peterson CM, Klepper B, Pumphrey FB, Rickman RW.** 1984. Restricted rooting decreases tillering and growth of winter wheat. *Agronomy Journal* **76**, 861-863.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E.** 2009. Aqua Crop the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Agronomy journal* **101**, 438-447.
- Richards RA, Townley-Smith TF.** 1987. Variation in leaf area development and its effects and water use, yield and harvest index of droughted wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* **38**, 983-992.
- Rickman RW, Klepper BL, Peterson CM.** 1983. Time distribution for describing appearance of specific culms of winter wheat. *Agronomy journal* **75**, 551-556.
- Salazar O, Wesstrom I, Youssef MA, Wayne, Skaggs R, Joel A.** 2009. Evaluation of the DRAINMOD-N II model for predicting nitrogen losses in loamy sand under cultivation in southeast Sweden. *Agricultural Water Management* **96**, 267-281.
- Salter PJ, Goude JE.** 1967. Crop responses to water at different stages of growth. Common Wealth Bureau of Horticultural and Plantation Corps. Research Review No, 2. p. 246.
- Simane B, Peacock JM, Struik PC.** 1993. Differences in development and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Plant and Soil* **157**, 155-166.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. 2009. Aqua Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* **101**, 426-437.

Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L. 2009. Assessment of Aqua Crop, Crop Syst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal* **101**, 509-521.

Tunio SD, Korejo MN, Jarwar AD, Waggan MR. 2006. Studies on indigenous and exotic weed competition in wheat. *Pakistan Journal of Agriculture and Biology* **5(4)**, 1-8.

Willmott CJ, Akleson GS, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, Odonnell J, Rowe CM. 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* **90**, 8995-9005.

Zekele KT, Wade LJ. 2012. Evapotranspiration Estimation Using Soil Water Balance, Weather and Crop Data, Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling, Dr. Ayse Irmak (Ed.) 19pp.



Evaluation of the FAO Aqua-Crop model for Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) on the eastern Algeria under semi-arid conditions

Guendouz Ali¹, Maamri Khalifa², Moumeni Lyes³ and Hafsi Miloud³

National Institute of the Agronomic Research of Algeria,
Research Unit of Setif (INRAA), Algeria.

Received: 05-05-2017

Accepted: 29-06-2017

DOI:10.18805/ijare.v51i04.8430

ABSTRACT

The relative yield decline that is expected under specific levels of water stress at different moments in the growing period is estimated by integrating the FAO Ky approach in the soil water balance model BUDGET. FAO recently developed a water-driven model (Aqua-Crop) for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations. The Aqua Crop model was evaluated with experimental data collected during three cropping seasons; the field experiments were conducted in Setif, Algeria. The objective of the study is to quantify the water stress based on estimation of evapo-transpiration by Aqua Crop model in Durum wheat under stressed conditions. The results of this study proved the efficiency of the Aqua Crop model to quantify the water stress. Total water stress during three cropping seasons (2010-2013) ranged between 0.15 (15%) at Double ridges to anthesis stage to 0.56 (56%) at Anthesis to maturity stage. The AquaCrop model can adequately quantify water stress and can be used to explore management options to improve wheat water productivity.

Key words: Aqua Crop model, Durum wheat (*Triticum durum* Desf.), Water stress, Semi arid conditions.

INTRODUCTION

Stress is an altered physiological condition caused by factors that tend to disrupt the equilibrium. Strain is any physical and chemical change produced by a stress (Gaspar *et al.*, 2002). Stress being a constraint or highly unpredictable fluctuations imposed on regular metabolic patterns which cause injury, disease or aberrant physiology. Plants are frequently exposed to many stresses such as drought, low temperature, salt, flooding, heat, oxidative stress and heavy metal toxicity, while growing in nature (Jaleel *et al.*, 2009). Drought is a meteorological term and is commonly defined as a period without significant rainfall. Generally drought stress occurs when the available water in the soil is reduced and atmospheric conditions cause continuous loss of water by transpiration or evaporation. The effects of drought on yield depend on severity and the stage of plant growth during which it occurs. In plants, a better understanding of the morpho-anatomical and physio-biochemical characteristics of changes in drought resistance could be used to select or create new varieties of crops to obtain a better productivity under water stress conditions (Sharma and Thind, 2016). FAO recently developed a water-driven model for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations (Steduto *et al.*, 2009; Hsiao

et al., 2009). Aqua-Crop is a crop water productivity simulation model developed by the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). It simulates crop yield response to water, and is particularly suited to address conditions where water is a key limiting factor in crop production. The model evolved from the concepts of crop yield response to water developed by Doorenbos and Kassam (1979). In addition, the model is used in Algeria to evaluate the genotypes performance under semi-arid conditions (Guendouz *et al.*, 2014). The objective of the study is to quantify the water stress based on the estimation of evapo-transpiration by Aqua-crop model in Durum wheat under drought conditions.

MATERIALS AND METHODS

Climatic data: The weather data required by Aqua Crop model are daily values of minimum and maximum air temperature, reference crop evapotranspiration (ET₀), rainfall and mean annual carbon dioxide concentration (CO₂). ET₀ was estimated using ET₀ calculator considering the daily maximum and minimum temperature, wind speed at 2 m above ground surface and mean relative humidity (RH). Rainfall depths of 405.3 mm, 313.8 mm and 411.0 during the crop growth seasons were recorded during 2010/2011, 2011/2012 and 2012/2013, respectively.

*Corresponding author's e-mail: guendouz.ali@gmail.com

¹National Institute of the Agronomic Research of Algeria, Research Unit of Setif (INRAA), Algeria.

²Department of Agronomy, Mohamed El Bachir El Ibrahimy University of Bordj Bou Arréridj, Algeria.

³Department of Agronomy, Ferhat ABBAS University of Setif, Algeria.

Description of Aqua-Crop model: Aqua Crop has four sub-model components: (i) the soil (water balance); (ii) the crop (development, growth and yield); (iii) the atmosphere (temperature, rainfall, evapotranspiration (ET) and carbon dioxide (CO₂) concentration); and (iv) the management (major agronomy practices such as planting dates, fertilizer application and irrigation if any). Aqua-Crop calculates daily water balance that includes all the incoming and outgoing water fluxes (infiltration, runoff, deep percolation, evaporation and transpiration) and changes in soil water content. There are five weather input variables required to run AquaCrop including daily maximum and minimum air temperatures (T), daily rainfall, daily reference evapotranspiration (ET₀) and the mean annual CO₂ concentration in the bulk atmosphere. While the first four are derived from typical agro-meteorological stations, the CO₂ concentration uses the Mauna Loa Observatory records in Hawaii. The advantage with Aqua-Crop is that it requires only a minimum input data, which are readily available or can easily be collected. Aqua-Crop has default values for several crop parameters that it uses for simulating different crops including wheat, however, some of these parameters are not universal and thus have to be adjusted for local conditions, cultivars and management practices. For a more detailed description of the Aqua-Crop model see the papers of Geerts *et al.* (2009); Hsiao *et al.* (2009) and Steduto *et al.* (2009).

Water stress quantification: Four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) were chosen for study based on their differences in yield performance and water stress tolerance (Oued Zenati, Boussemam, Altar and Mexicali75). Doorenbos and Kassam (1979), describing the relation between water stress and the corresponding expected yield is very useful:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = k_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_p} \right) \dots\dots\dots 1$$

where Y_a/Y_m is the relative yield; $(1 - Y_a/Y_m)$ the relative yield decrease, ET_a/ET_p the relative evapotranspiration and $(1 - ET_a/ET_p)$ the water stress or relative evapotranspiration deficit. In the model, the actual yield (Y_a) is expressed as a fraction of maximum yield (Y_m) that can be expected under the given growing conditions for non-limiting water conditions. In addition, ET_a refers to the actual crop evapotranspiration under the given growing conditions and ET_p is the evapotranspiration under the same conditions but for non-limiting water conditions. With the help of Eq. (1) the yield response to water stress during the total growing period or during defined growth stages can be described. When studying individual stages $(1 - ET_a/ET_p)$ in Eq. (1) refers to the water stress during the studied individual growth stage and K_y the yield response factor of the stage. K_y coefficients for the total growing period and individual growth stages for several crops are presented by Doorenbos and Kassam (1979). The yield response factors (K_y) is dependent on locations, for example, Dehghanisanij *et al.* (2009) presented the seasonal K_y for winter wheat in Mashhad and Karaj (both in Iran) as 1.03 and 1.23, respectively while Doorenbos and Kassam (1979) presented it as 1.0.

RESULTS AND DISCUSSION

Water stress during first stage (Emergence to double ridges (GS1)): During this stage and at all cropping seasons (2010-2013) water stress values ranged from 0.37 at first cropping season (2010/2011) to 0.47 at third cropping season

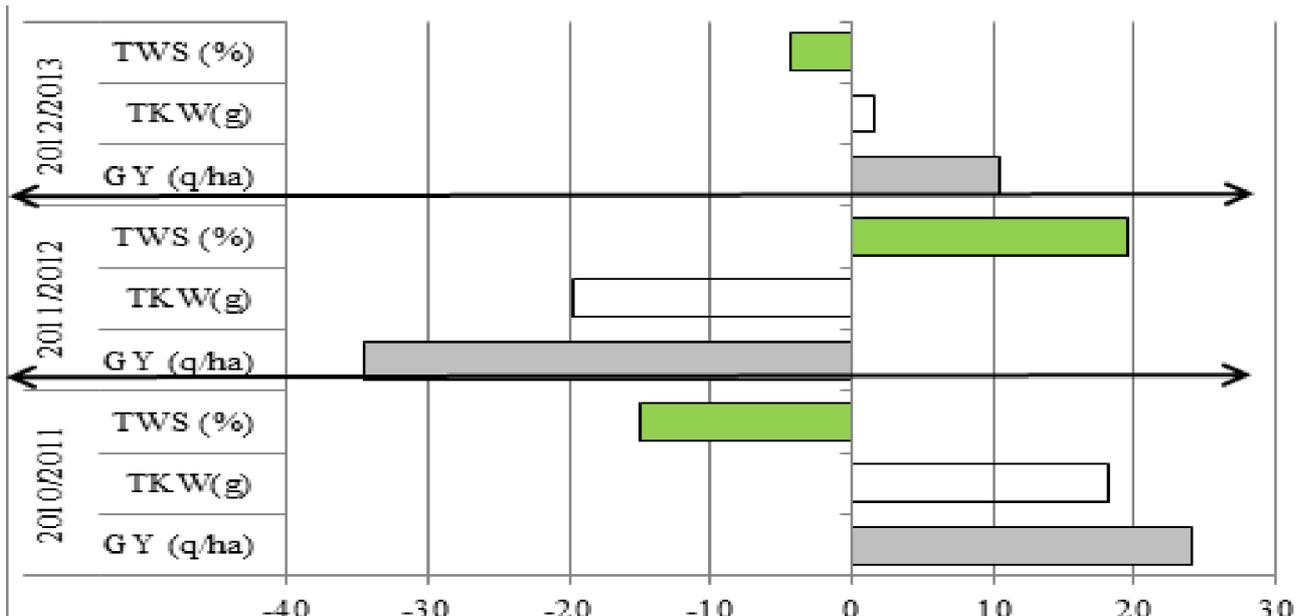


Fig 1: Deviation from the mean values of Grain yield (GY) thousand kernel weight (TKW) and total water stress (TWS) during three cropping seasons (2010-2013)

(2012/2013), with a mean of 0.43 for all cropping seasons (Table 1). Water stress may affect the growth of wheat, but the effects are small when stress occurs in the early stages than when it occurs in the late vegetative phase and during grain filling (Abayomi and Wright, 1999). Water stress during GS1 may increase the phyllochron of bread and durum wheat (Krenzer *et al.*, 1991; Simane *et al.*, 1993), but leaf expansion is most sensitive to water stress (Acevedo *et al.*, 1971) and leaf growth can be drastically reduced at leaf water potentials of -0.7 to -1.2 MPa (Eastham *et al.*, 1984). Tillering is also very sensitive to water stress being almost halved if conditions are dry enough (Peterson *et al.*, 1984; Rickman *et al.*, 1983). As a result, leaf area index development is the most affected physiological process during this stage. Water deficit just before flower initiation may also decrease the number of spikelet primordia at this stage (Oosterhuis and Cartwright, 1983).

Water stress during second stage (Double ridges to anthesis (GS2)): As shown in Table 1, water stress varied between 0.09 at third cropping season and 0.2 at first cropping season.

Wheat plant growth (roots, leaves, stems and ears) continues up to approximately 10 days after anthesis. GS2 is therefore a period of very active plant growth. It follows that mild to moderate water deficits during this period will decrease cell growth and leaf area with consequent decrease of photosynthesis per unit area. If the water deficit is more intense, net photosynthesis will decrease even more due to partial stomata closure (Acevedo, 1991). Water stress during this stage also decreases spikelets per spike of fertile tillers (Hochman, 1982) and causes death of the distal and basal florets of the spikes (Oosterhuis and Cartwright, 1983).

Water stress during third stage (Anthesis to maturity (GS3)): During this stage and at all cropping seasons (2010-2013) water stress values ranged from 0.41 to 0.74. The highest water stress was registered during second cropping

season (2011/2013) with a total mean of 0.56 (Table 1). Water deficit close to anthesis accelerates development (Simane *et al.*, 1993). The remobilization of pre-anthesis assimilates to the grain becomes very important as photosynthesis is decreased by water stress and total non-structural carbohydrates from wheat leaves and stems (particularly fructans and sucrose) significantly contribute to grain growth (Bidinger *et al.*, 1977; Palta *et al.*, 1994). Water stress may affect the growth of wheat, but the effects are small when stress occurs in the early stages than when it occurs in the late vegetative phase and during grain filling (Abayomi and Wright, 1999). Guendouz *et al.* (2013) registered that the absence of significant correlation between grain yield and thousand-kernel weight noted when the water stress is shown during the period of grain filling.

Direct effect of water stress on GY and 1000 kernel weight (TKW) : As shown in Figure 1, water stress affects negatively grain yield and thousand kernels weight. Decrease in growth rate is caused by reduction in radiation use efficiency when drought was imposed at various growth stages, such as tillering, booting, earing, anthesis, and grain development stages; Ashraf (1998), reported that water stress at anthesis reduces pollination and thus less number of grains are formed per spike which results in the reduction of grain yield. Moisture stress is known to reduce biomass, tillering ability, grains per spike and grain size at any stage when it occurs. So, the overall effect of moisture stress depends on intensity and length of stress (Bukhat, 2005). Water stress imposed during later stages might additionally cause a reduction in number of kernels/ear and kernel weight (Gupta *et al.*, 2001; Dencic *et al.*, 2000).

CONCLUSIONS

The results of this study proved the efficiency of the AquaCrop model to quantify the water stress. Total water stress during three cropping seasons (2010-2013) ranged between 0.15 (15%) at Double ridges to anthesis stage to

Table 1: Water stress variation depending on stages during three cropping seasons (2010-2013).

	Stages	Days	ETa	ETp	Water stress
Cropping season 2010/2011	Emergence to double ridges (GS1)	38,75	53,38	33,43	0,37
	Double ridges to anthesis (GS2)	159,25	329,38	263,63	0,2
	Anthesis to maturity (GS3)	189,25	170,13	99,8	0,41
	Stages	Days	ETa	ETp	Water stress
Cropping season 2011/2012	Emergence to double ridges (GS1)	38,75	46,7	25,8	0,45
	Double ridges to anthesis (GS2)	159,25	318,2	261,8	0,17
	Anthesis to maturity (GS3)	189,25	201,875	51,55	0,74
	Stages	Days	ETa	ETp	Water stress
Cropping season 2012/2013	Emergence to double ridges (GS1)	38,75	58,78	31,08	0,47
	Double ridges to anthesis (GS2)	159,25	362,38	330,93	0,09
	Anthesis to maturity (GS3)	189,25	171,78	77,98	0,54
	Stages	Days	ETa	ETp	Water stress
Mean of three seasons	Emergence to double ridges (GS1)	38,75	52,9	30,1	0,43
	Double ridges to anthesis (GS2)	159,25	336,65	285,45	0,15
	Anthesis to maturity (GS3)	189,25	181,26	76,44	0,56

0.56 (56%) at Anthesis to maturity stage. As illustrated in Figure 1, and during second cropping season (2011/2012) total water stress (45%) several affect grain yield and thousand kernels weight (-35 and -20% respectively). The first cropping season (2010/2011) considered as the favorable season compared with the other season. This

model can be used as a decision support tool in increasing water productivity by project managers, consultants, irrigation engineers and farmers. In the other words, this model can be used to simulate the water management effects on yield and handle managements that increase water productivity.

REFERENCES

- 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., Hsiao, T.C. and Henderson, D.W. (1971). Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiol.*, **48**: 631-636.
- Acevedo, E., Harris, H. and Cooper, P.J. M. (1991). Crop architecture and water use efficiency in Mediterranean environments. In Soil and Crop Management for Improved Water Use Efficiency in Rainfed Areas, H. Harris, P.J.M. Cooper and M. Pala, eds. p.106-118. ICARDA, Syria
- Ashraf. M.Y. (1998). Yield and yield components response of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under different soil water deficit conditions. *Acta Agron. Hung.*, **46**: 45-51.
- Bidinger, F.R., Musgrave, R.B. and Fischer, R.A. (1977). Contribution of stored pre-anthesis assimilates to grain yield in wheat and barley. *Nature*, **270**: 431-433.
- Bukhat, N. M. (2005). Studies in yield and yield associated traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought conditions. M.Sc Thesis Department of Agronomy. Sindh Agriculture University, Tandojam, Pakistan.
- Eastham, J., Osterhuis, D.M. and Walker, S. (1984). Leaf water and turgor potential threshold values for leaf growth of wheat. *Agron. J.*, **76**: 841-847.
- Dencic, S., R. Kastori, B. Kobiljski and Duggan, B. (2000). Evaporation of grain yield and its components in wheat cultivars and land races under near optimal and drought conditions. *Euphytica* , **1**: 43-52.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper n. 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
- Hochman, Z.V.I. (1982). Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field Crop Res.*, **5**: 55-67.
- Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and Fereres, E. (2009). Aqua-Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.*, **101**: 448–459.
- Gaspar, T., T. Franck, B. Bisbis, C. Kevers, L. Jouve, J.F. Hausman and Dommès, J. (2002). Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. *Plant Growth Regul.*, **37**: 263–285.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., et. al.,(2009). Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with Aqua-Crop. *Agronomy Journal*, **101**:499 508.
- Guendouz, A. Guessoum, S. Maamri, K. Benidir, M. and Hafsi, M. (2013). Performance of ten durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi arid conditions (north africa-Algeria-). *Indian Journal of Agricultural Research*, **47**(4): 317-322.
- Guendouz, A., M. Hafsi, L. Moumeni, Z. Khebbat and Achiri, A. (2014). Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi arid conditions in Eastern Algeria. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.*, **3**(2): 168-176
- Gupta, N. K., Gupta, S. and Kumar, A. (2001). Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield in wheat cultivars at different growth stages. *J. Agron.*, **86**: 143 7-1439.
- Jaleel, C.A., P. Manivannan, A. Wahid, M. Farooq, R. Somasundaram and Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol.*, **11**: 100–105.
- Krenzer, E.G., Nipp, T.L. and McNew, R.W. (1991). Winter wheat mainstem leaf appearance and tiller formation vs. moisture treatment. *Agron. J.*, **83**: 663-667.
- Oosterhuis, D.M. and Cartwright, P.M. (1983). Spike Differentiation and floret survival in semi dwarf spring wheat as affected by water stress and photoperiod. *Crop Sci.*, **23**: 711-716.
- Palta, J.A., Kobata, T., Turner, N.C. and Fillery, I.R. (1994). Remobilization of carbo and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop Sci.*, **34**: 118-124.
- Peterson, C.M., Klepper, B., Pumphrey, F.B. and Rickman, R.W. (1984). Restricted rooting decreases tillering and growth of winter wheat. *Agron. J.*, **76**: 861-863.
- Rickman, R.W., Klepper, B.L. and Peterson, C.M. (1983). Time distribution for describing appearance of specific culms of winter wheat. *Agron. J.*, **75**: 551-556.
- Sharma, M., and Thind, S. K. (2016). Effect of water deficit on accumulation of proteins in wheat seedlings correlates with grain filling. *Indian Journal of Agricultural Research*, **50**(6): 635-638.
- Simane, B., Peacock, J.M. and Struik, P.C. (1993). Differences in development and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Plant and Soil*, **157**: 155-166.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. (2009). Aqua-Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, **101**: 426 437.

ملخص: نمذجة إنتاجية القمح الصلب في بيئة شبه جافة باستخدام برنامج "Aqua-Crop"

نماذج المحاكاة التي توضح تأثير المياه على إنتاجية المحاصيل، هي أدوات مفيدة لتحسين تسيير استخدام المياه. طورت منظمة الأغذية والزراعة نموذجًا خاصًا بالماء لاستخدامه كأداة في التخطيط وتحليل السيناريوهات في مواسم ومواقع مختلفة. الهدف من هذه الدراسة هو التحقق من قدرة نموذج AquaCrop على محاكاة السلوك الزراعي للقمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) تحت الظروف شبه الجافة في شرق الجزائر. تم تقييم نموذج AquaCrop ببيانات تجريبية ميدانية تم جمعها خلال خمسة مواسم زراعية (2010-2016) حيث تراوح إجمالي الإجهاد المائي بين 20% في مرحلة النضج-التسبييل وصولاً إلى 66% في مرحلة التسبييل-النضج. أثبتت نتائج هذه الدراسة كفاءة نموذج Aqua Crop لتقييم الإجهاد المائي. كانت نتائج المؤشرات الإحصائية مثل متوسط جذر مربع الخطأ (RMSE)، متوسط الخطأ المطلق (AAE)، مؤشر الاتفاق (d) وخطأ التنبؤ (Pe) 1.71، 1.48، 0.77 و 19.25% على التوالي لمحصول الحبوب؛ و 2.79، 2.58، 0.33 و 8.57% على التوالي للكتلة الحيوية النهائية. تمكن نموذج AquaCrop من محاكاة مؤشر الحصاد بدقة حيث أعطى مؤشر الاتفاق (d) = 0.76، RMSE و AAE 9.84 و 7.59 على التوالي. يمكن لنموذج AquaCrop قياس كمية المياه بشكل فعال كما يمكن استخدامه لتسيير المياه لتحسين إنتاجية القمح. إن بساطته نظرًا للحد الأدنى من بيانات الإدخال المطلوبة والتي يمكن الحصول عليها وجمعها بسهولة، يمكن أن يجعله سهل الاستخدام للمستعملين.

الكلمات المفتاحية: نموذج AquaCrop؛ القمح الصلب؛ ظروف شبه الجافة؛ الإجهاد المائي؛ محصول الحبوب.

Résumé : Modélisation de la productivité du blé dur en milieu semi aride en utilisant le programme « Aqua-Crop »

Les modèles de simulation qui illustrent les effets de l'eau sur le rendement des cultures, sont considérés comme des outils utiles pour améliorer la gestion de l'eau et optimiser l'efficacité de son utilisation. La FAO a récemment mis au point un modèle axé sur l'eau nommé AQUACROP. Cet outil d'aide à la décision, permet la planification et l'analyse de scénarios dans différentes saisons et dans divers endroits avec une sophistication limitée. L'objectif de cette recherche est de valider le modèle AQUACROP pour sa capacité à simuler la performance du blé (*Triticum durum Desf.*) dans les conditions semi-arides de l'Est algérien. Ce modèle a été évalué à l'aide de données expérimentales sur le terrain, recueillies au cours de cinq campagnes culturales (2010-2016) où le stress hydrique total varie de 20% au stade tallage-épiaison à 66% au stade épiaison-maturité. Les résultats de cette étude ont prouvé l'efficacité du modèle Aqua Crop pour quantifier le stress hydrique. Les résultats des indices de fiabilité tels que, l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (AAE), l'indice d'accord (d) et l'erreur de prédiction (Pe) ont été respectivement de : 1,71, 1,48, 0,77 et 19,25% pour le rendement grainier; et de : 2,79, 2,58, 0,33 et 8,57% respectivement, pour la biomasse finale aérienne. AquaCrop a été capable de simuler avec précision l'indice de récolte avec un d = 0,76, RMSE et AAE de 9,84 et 7,59, respectivement. Le modèle AquaCrop est alors adéquat pour quantifier le stress hydrique et peut être utilisé dans l'exploration des options de gestion afin d'améliorer la productivité du blé à l'eau. Sa simplicité, en raison de ses données d'entrée minimales requises, qui sont facilement disponibles ou collectées, le rend convivial pour les utilisateurs.

Mots clés: modèle AquaCrop, blé dur; Conditions semi-arides; stress hydrique; Rendement en grains.

Abstract: Modeling the productivity of durum wheat in a semi-arid environment using the "Aqua-Crop" program

Simulation models that clarify the effects of water on crop yield, are useful tools for improving farm level water management and optimizing water use efficiency. FAO recently developed a water-driven model for use as a decision support tool in planning and scenario analysis in different seasons and locations with limited sophistication. The objective of this study is to validate the AquaCrop model for its ability to simulate wheat (*Triticum durum Desf.*) performance under semi-arid conditions in East of Algeria. The AquaCrop model was evaluated with field experimental data collected during five cropping seasons (2010-2016) where total water stress ranged between 20% at Emergence-Heading stage to 66% at Heading-Maturity stage. The results of this study proved the efficiency of the Aqua Crop model to quantify the water stress. The results of reliability indices such as Root Mean Square Error (RMSE), Average Absolute Error (AAE), Index of agreement (d), and Prediction error (Pe) were 1.71, 1.48, 0.77 and 19.25 % respectively for grain yield; and 2.79, 2.58, 0.33 and 8.57 % respectively for final above-ground biomass. The AquaCrop model was able to accurately simulate harvest index giving a d = 0.76, RMSE and AAE of 9.84 and 7.59, respectively. The AquaCrop model can adequately quantify water stress and can be used to explore management options to improve wheat water productivity. His simplicity due to its required minimum input data, which are readily available or can easily be collected, can made it user-friendly for users.

Key words: AquaCrop model; Durum wheat; Semi-arid conditions; water stress; Grain yield.