



DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

N°/SNV/2015

THÈSE

Présentée par

NOUAR Hind

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière: AGRONOMIE

Spécialité: PRODUCTION VÉGÉTALE

THÈME

**Contribution à l'étude de l'interaction génotype- environnements
du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen :
Application des modèles de la régression conjointe et de l'AMMI.**

Soutenue publiquement le 29/04/2015

DEVANT LE JURY

Président	Madani Toufik	Pr. UFA Sétif 1
Directeur	Bouzerzour Hamenna	Pr. UFA Sétif 1
Co-directeur	Hazmoune Tahar	Pr. Univ. Skikda
Examineurs	Benmahammed Amar	Pr. UFA Sétif 1
	Baka Mebarek	Pr. Univ. Constantine 1
	Benbelkacem Abdelkader	Dr. Dir Rec INRAA Constantine

Laboratoire de Valorisation des ressources biologiques naturelles

Remerciements :

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au professeur Bouzerzour Hamenna qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris.

J'exprime également ma reconnaissance à mon co-directeur M^r Hazmoune Tahar Professeur à l'université de Skikda pour son aide et sa collaboration pour l'élaboration de ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à M^r Madani Toufik, Professeur à l'université de Sétif -1- qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier également Messieurs Bemahamed Amar Professeur à l'université de Sétif -1-, Baka Mebarek Professeur à l'université de Constantine -1-, et Docteur Benbelkacem Abdelkader directeur de recherche INRAA-Constantine, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour le temps consacré à la lecture du manuscrit.

Je remercie tout le personnel de la station ITGC de Sétif de m'avoir accueilli et de m'avoir permis de travailler dans de bonnes conditions, surtout M^r Zerargui Hocine. Je remercie également mes collègues des différentes stations de l'ITGC où s'est déroulée l'expérimentation (El Khroub, Sidi Bel Abbés, et Saida) pour leurs collaborations.

J'adresse toute ma gratitude à tous mes collègues et à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

Résumé : La présente thèse est structurée de deux parties, la première a permis d'illustrer le gain génétique apporté par les nouvelles sélections Waha et Bousselam comparativement à MBB. La réponse à la variation climatique des trois variétés de blé dur montre que les composantes du rendement sont différemment affectées. La deuxième partie révèle une variation du rendement grain de 12 génotypes de blé dur évalués sur cinq environnements. Le modèle AMMI explique 90.80% de la somme des carrés des écarts de l'interaction. Cette analyse montre également que le cultivar Waha présente une large adaptation à tous les sites, contrairement à Badre, Setifis, Gaviota durum et Mrb5 qui présentent une adaptation spécifique aux différents sites, ainsi l'analyse GGE-biplot indique que les cinq milieux d'étude représentent trois sous-régions où Mrb3, Bousselam et Badre étaient les plus performants et présentent une adaptation spécifique aux différents sites.

Mots clés : *Triticum durum*, interaction, AMMI, GGE-biplot, performance, stabilité.

Abstract: This thesis is structured in two parts, the first of which served to illustrate the genetic gain with the new selections Waha and Bousselam over MBB. The response of the three durum wheat varieties to climate variation showed that yield components were differentially affected. The second part shows yield variation of 12 durum wheat genotypes which were tested in five environments. AMMI models explains 90.80% of the interaction sum square. This analysis also shows that the cultivar Waha has a wide adaptation to all sites, unlike Badre, Setifis, Gaviota durum and Mrb5 who have a specific adaptation to different sites. While GGE-biplot analysis indicates that the five environments represented three sub-regions where Mrb3, Bousselam and Badre were the winners.

Keys words: *Triticum durum*, interaction, AMMI, GGE-biplot, performance, stability.

ملخص: يتمحور هذا البحث الى قسمين، القسم الاول يوضح اهمية الربح الوراثي بالنسبة لصنفي Waha و Bousselam مقارنة ب MBB. الاستجابة لتغير المناخ لدى الأصناف الثلاث من القمح الصلب تبين أن مكونات المردود تتأثر بشكل مختلف. يظهر القسم الثاني من الدراسة التباين في المردود الحبي لـ 12 صنف من القمح الصلب والتي تم تقييمها في خمسة مواقع . أوضح نموذج المركبات الأساسية للتفاعل AMMI 90.80 % من مجموع الانحرافات التربيعية للتفاعل . وأشار هذا التحليل إلى أن الصنف واحة يظهر تاقلم واسع لكافة المواقع التجريبية عكس Badre, Setifis, MRB5 لها تكيفات نوعية مع مختلف البيئات نموذج GGE-biplot تشير إلى أن اوساط الدراسة الخمسة تمثل ثلاثة أقاليم فرعية، 3، MRB Bousselam و Badre ابدت قدرات عالية وكذا تاقلم نوعي خاص بكل موقع.

كلمات دالة: القمح الصلب، تفاعل، GGE-biplot، AMMI، استقرار، قدرة.

Liste des abréviations

Abréviation	Explication
Acsad	Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Land
ADE	Aide à la décision économique
AEA	Average-environment axis
AEC	Average-environment coordination
AMMI	Additive Main Effect Multiplicative Interaction.
ASV	Average Shared Variance
CIC	Conseil international des céréales
Cimmyt	International Maize and Weat Improvement
CNCC	Centre national de contrôle et de certification des semences et plants
FAO	Food and Agriculture Organization
GGE	Genotype and genotype-environment interaction
GXE	Interaction génotype avec l'environnement ou milieu
HAR	Harrouche
Ht	Hauteur du chaume (cm)
Icarda	International Centre for Agriculture Research in the Dry Areas
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPC1	Première composante principale
IPC2	Deuxième composante principale
IPCC	Intergovernmental Panel on climat change

ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
KH	Khroub
MADR	Ministère de l’agriculture et développement rural
MBB	Mohamed Ben Bachir
Mrb	Oum Rabie
NE	Nombre des épis par mètre carré
NGE	Nombre de grains par épi
NGM ²	Nombre de grains par mètre carré
Pi	l’indice de la supériorité génotypique
PMG	Poids de mille grains (g)
PREC	Précocité à l’épiaison (Durée de la phase végétative (jours))
RDT	Rendement grains (g/m ²)
SAI	Saida
SBA	Sidi Bel Abbas
SET	Sétif
SR	Sous-région

Liste des tableaux

	Titre	Page
1	Table du modèle additif de l'analyse de la variance adoptée (McIntosh, 1983).	35
2	Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée des variables mesurées au cours des 7 campagnes agricoles sur les trois génotypes.	39
3	Effet moyen campagne des variables mesurées.	40
4	Effet moyen génotype des variables mesurées.	42
5	Analyse de la régression progressive du rendement sur les composantes chez les 3 génotypes.	49
6	Valeurs des paramètres climatiques utilisés pour expliquer la variation du rendement grain et des composantes du rendement grain des trois génotypes étudiés.	51
7	Analyse de la régression progressive du rendement des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.	52
8	Analyse de la régression progressive du nombre de grains par m ² des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.	57
9	Analyse de la régression progressive du nombre d'épis par m ² des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.	61
10	Analyse de la régression progressive du nombre de grains par épi de Waha et MBB et du poids de 1000 grains de Bousselam sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.	64

11	Facteurs climatiques affectant le rendement et les composantes des différentes variétés testées.	69
12	Caractéristiques des sites expérimentaux.	80
13	Pedigree des lignées de blé dur évaluées sur les cinq sites expérimentaux en 2009/2010.	81
14	Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance du rendement grain mesuré par site.	86
15	Rendements moyens des génotypes évalués sur cinq sites au cours de la campagne 2009/10.	88
16	Analyse de variance du rendement grain ($t\ ha^{-1}$) selon les modèles de la régression et l'AMMI ₂ .	88
17	Rendement et gain de rendement attendu de la sélection pour l'adaptation générale et l'adaptation spécifique.	89
18	Valeurs de l'indice de la supériorité génotypique, la variance inter sites et la stabilité AMMI des 12 génotypes.	90
19	Coefficients de corrélation de Spearman (r_s) entre les différents paramètres mesurant la stabilité et la moyenne des rendements (Y_i) des 12 génotypes évalués sur les 5 sites.	92

Liste des figures

	Titre	Page
1	Variabilité des formes des épis des blés durs algériens (Ducellier, 1930).	6
2	Evolution de la production (x1000 qx) du blé dur (MADR, 2011).	7
3	Evolution de la production (x 10 ⁶ qx) des principaux pays producteurs de blé dur (Fao stat, 2007).	8
4	Phylogénie des espèces de blés (Feldman <i>et al.</i> , 1995).	10
5	Variété de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) au stade maturité physiologique (Haddad, 2010).	11
6	Phases de formation des différentes composantes du rendement (Meynard et David, 1992).	13
7	Différence de précocité au stade épiaison chez le blé tendre (Rebetzke <i>et al.</i> , 2007).	18
8	Différence de vigueur de la croissance précoce chez le blé tendre (Rebetzke <i>et al.</i> , 2007).	19
9	Glauescence de la gaine et du limbe de la feuille étendard du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) (Haddad, 2010).	21
10	Variation de la température moyenne mensuelle des sept campagnes d'étude.	38
11	Variation de la pluviométrie mensuelle des sept campagnes d'étude.	38
12	Relation entre le rendement grain par campagne et le cumul pluviométrique du cycle de la culture.	41
13	Performances de rendement grain des trois génotypes par campagne.	43
14	Ecarts de rendement grain de Waha et Bousselam en % du rendement de MBB.	43

15	Réactivité des trois variétés pour la performance de rendement grain selon la fertilité du milieu.	44
16	Variation de la hauteur de la plante des trois variétés selon les campagnes.	47
17	Variation de la durée de la phase végétative des trois variétés selon les campagnes.	48
18	Variation de la baisse de rendement grain de MBB en fonction de la température moyenne hivernale des sept campagnes d'étude.	52
19	Variation de la baisse de rendement grain chez Bousselam en fonction de la variation de pluviométrie du mois de mars des sept campagnes d'étude.	53
20	Variation de la baisse de rendement grain chez Waha en fonction du nombre de jours dont la température maximale est égale ou supérieure à 25°C au cours des sept campagnes d'étude.	54
21	Variation de la baisse de rendement grain (t/ha) en fonction de la réduction du nombre de grains produit par m ² observée au cours des sept campagnes d'étude, chez les trois cultivars.	56
22	Variation de la baisse du nombre de grains produit par m ² chez MBB en fonction de la variation de la température moyenne du mois de janvier des sept campagnes d'étude.	58
23	Variation de la baisse du nombre de grains produit par m ² chez Bousselam en fonction de la variation de la pluviométrie du mois de mars des sept campagnes d'étude.	59
24	Variation de la baisse du nombre de grains produit par m ² chez Waha en fonction de la variation du nombre de jours dont la température est égale ou supérieure 25°C au cours des sept campagnes d'étude.	60

25	Réduction observée du nombre d'épis m ² de MBB en fonction de la variation observée du nombre de jours dont la température est $\geq 25^{\circ}\text{C}$ au cours des sept campagnes d'étude.	62
26	Réduction observée du nombre d'épis m ² de Waha en fonction de la variation observée de la température moyenne du mois de mai des sept campagnes d'étude.	63
27	Réduction observée du nombre d'épis m ² de Bousselam en fonction de la variation observée du cumul pluviométrique du cycle de la culture (novembre-juin) au cours des sept campagnes d'étude.	63
28	Réduction observée du nombre de grains par épi chez MBB en fonction de la variation observée de la température moyenne du mois de janvier des sept campagnes d'étude.	66
29	Réduction observée du nombre de grains par épi chez Waha en fonction de la variation observée de la température moyenne hivernale (moyenne de janvier et février) des sept campagnes d'étude.	67
30	Réduction observée du poids de 1000 grains de Bousselam en fonction de la variation observée de la pluviométrie du mois de mai des sept campagnes d'étude.	67
31	Biplot AMMI ₁ des effets moyens génotypes et sites et les scores de l'IPCA ₁ (HAR= Harrouch, KHR = Khroub, SAI = Saïda, SBA= Sidi Bel Abbes, SET= Sétif).	89
32	Biplot AMMI ₂ des scores des génotypes et des sites sur les IPCA ₁ et IPCA ₂ (HA= Harrouch, KH= Khroub, SA = Saïda, SB= Sidi Bel abbés, SE= Sétif).	92
33	Relations entre les valeurs de l'indice Pi et le rendement génotypique marginal (Yi.).	93
34	Sous régions et génotypes performants ou « which-wins-where ».	95

35	Classement des sites en fonction de la capacité de discrimination et de la représentativité.	96
36	Classement des génotypes sur la base de la performance et de la stabilité.	98
37	Comparaison des performances des génotypes sur le site du Khroub.	100
38	Comparaison des performances génotypiques sur le site de Sétif.	100
39	Classement des sites en fonction de la performance du génotype Badre.	101
40	Classement des sites en fonction de la performance du génotype Mrb3.	101

Sommaire

Contenu	Page
INTRODUCTION GENERALE.....	1
 CHAPITRE I- REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. IMPORTANCE DU BLE DUR (<i>Triticum durum</i> Desf.).....	5
1.1. <i>En Algérie</i>	5
1.2. <i>Dans le monde</i>	7
2. HISTORIQUE ET ORIGINE GENETIQUE DU BLE DUR	8
2.1. <i>Historique</i>	8
2.2. <i>Origine génétique du blé dur</i>	9
3. BIOLOGIE ET CYCLE VEGETATIF DU BLE DUR.....	10
4. ELABORATION DU RENDEMENT DU BLE DUR.....	12
5. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES DE LA PRODUCTION DU BLE DUR	15
5.1. <i>Stress hydrique</i>	15
5.2. <i>Stress thermique</i>	16
6. MECANISMES D'ADAPTATION DE LA PLANTE AUX STRESS ABIOTIQUES	17
6.1. <i>Adaptations phénologiques</i>	17
6.2. <i>Adaptations morphologiques</i>	18
6.3. <i>Adaptations physiologiques</i>	22
7. AMELIORATION DE LA TOLERANCE DU BLE DUR AU STRESS.....	23
8. ANALYSE DE L'ADAPTATION AUX STRESS ABIOTIQUES	24

**CHAPITRE II : PERFORMANCES ET COMPORTEMENT DES
NOUVELLES OBTENTIONS DE BLE DUR (*Triticum durum* Desf.)
SELECTIONNEES SOUS CONDITIONS SEMI-ARIDES DES
HAUTES PLAINES ORIENTALES.**

Résumé	28
Abstract.....	28
INTRODUCTION.....	29
MATERIEL ET METHODES.....	32
1. <i>Matériel végétal et site expérimental.....</i>	32
2. <i>Dispositif expérimental.....</i>	32
3. <i>Suivi et notations.....</i>	32
4. <i>Analyse des données.....</i>	34
RESULTATS ET DISCUSSION.....	37
1. CONDITIONS CLIMATIQUES: PLUIE ET TEMPERATURE.....	37
1.1. <i>La température moyenne.....</i>	37
1.2. <i>La pluviométrie</i>	37
2. COMPORTEMENT VARIETAL	39
2.1. <i>Etude de la variation des caractères agronomiques des 3 génotypes</i>	39
2.1.1. <i>Le rendement et ses composantes.....</i>	39
2.1.2. <i>La hauteur de la plante et la précocité d'épiaison.....</i>	47
2.2. <i>Les déterminants du rendement grain chez les trois génotypes.....</i>	49
2.3. <i>Effets de la variation climatique sur les déterminants du rendement grain.....</i>	50
2.3.1. <i>Le nombre de grains par m².....</i>	55
2.3.2. <i>Le nombre d'épis, de grains par épi et le poids de 1000 grains.....</i>	60
CONCLUSION.....	74

**CHAPITRE III : ETUDE DE LA VARIATION
SPATIOTEMPORELLE DES RENDEMENTS DES VARIETES DE
BLE DUR (*TRITICUM DURUM* Desf.) EVALUEES SOUS LES
CONDITIONS SEMI-ARIDES DES HAUTS PLATEAUX :
APPLICATION DES MODELES DE LA REGRESSION
CONJOINTE, AMMI ET GGE.**

Résumé.....	75
Abstract.....	76
INTRODUCTION.....	77
MATERIEL ET METHODES	80
1. <i>Sites, géotypes et dispositif expérimental</i>	80
2. <i>Analyse des données.....</i>	81
RESULTATS ET DISCUSSION.....	85
1. <i>Performances de rendement intra et inter sites.....</i>	85
2. <i>Adaptation au milieu.....</i>	86
3. <i>La stabilité des performances inter sites.....</i>	90
4. <i>L'analyse GGE.....</i>	94
4.1. <i>Définition des sous régions et identification du meilleur géotype par sous-région.....</i>	94
4.2 <i>Discrimination et représentativité des sites d'évaluation.....</i>	95
4.3 <i>Performance et stabilité géotypiques.....</i>	97
4.4. <i>Performance par site.....</i>	99
CONCLUSION.....	105
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	106
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	110

INTRODUCTION GENERALE

La sélection du blé dur (*Triticum durum* Desf.), est conduite par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) conjointement avec l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC). Elle repose sur l'utilisation de la descendance provenant des croisements faits à la Station Centrale d'Oued Smar (Alger) et des introductions venant du Centre International de la Recherche Agronomique des Régions Arides (Icarda, Syrie), du Centre Arabe des Etudes des Zones Arides (Acsad, Syrie) et du Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (Cimmyt, Mexique) en particulier.

Le cycle de sélection dure plusieurs années. Dès la génération F7, le matériel sous sélection devient de plus en plus homogène, notamment pour les caractères à hérédité simple telles que la hauteur de la paille, la durée du cycle de végétation et la forme ou architecture globale de la plante (capacité de tallage, forme et couleur des épis). A ce stade de la sélection, les lignées pures, prometteuses, passent à l'étape des essais comparatifs de rendement. Cette étape dure trois à 4 années, durant lesquelles, le matériel soumis à la sélection est évalué sur plusieurs sites représentés par les stations expérimentales de la recherche agronomique, éparpillée sur tout le territoire, et certaines fermes pilotes (Meziani *et al.*, 2011).

Les stations expérimentales sont représentatives des différentes zones agro écologiques de production du blé dur. Les sélections émergentes de chaque station sont, de ce fait, adaptées à sa zone représentative. Les obtenteurs, ITGC et INRA, utilisent cette série d'essais d'évaluation pour identifier les variétés qui seront finalement présentées à l'inscription au catalogue national auprès du Centre National de Contrôle et de Certification des semences et plants (CNCC) et puis, éventuellement, multipliées et commercialisées auprès des agriculteurs pour leur adoption.

Cette évaluation variétale qui s'appuie sur de très nombreux essais variétaux multi locaux et pluriannuels, aussi indispensable que couteuse, ne semble pas avoir un impact sur la production nationale de cette espèce, qui reste loin des objectifs attendus. En effet malgré que la liste des nouvelles obtentions s'allonge à chaque édition du catalogue national, les agriculteurs restent attachés à l'utilisation des variétés anciennes dites locales (INRA, 2006). Sur un total de 32 variétés de blé dur listées, seules les variétés Waha, Vitron et Bousselam, au côté du blé tendre HD₁₂₂₀, connaissent un taux d'adoption relativement élevé par la grande culture (INRA, 2006).

Les nouvelles variétés proposées à la grande culture se montrent le plus souvent très sensibles à la variation du milieu, variation d'ordre climatique : gel, hautes températures, déficit hydrique (Mekhlouf *et al.*, 2006, Chennafi *et al.*, 2006 ; Belkherchouche *et al.*, 2008, Benmahammed *et al.*, 2010) aussi bien que techniques : fertilisation azotée, désherbage, dates et densités de semis, couverture phytosanitaire, irrigation (Chennafi *et al.*, 2011).

Dans ce contexte, la sélection est pratiquée sur la seule base de la performance de rendement grain, sans tenir compte des autres paramètres, et ils sont nombreux, dont entre autres la résilience vis-à-vis des stress, la valorisation des itinéraires à faibles inputs, qui donnent au rendement une certaine régularité. En effet la grande diversité des milieux de production et la grande variabilité climatique, même sur de courtes distances, engendrent, le plus souvent, l'interaction génotype x lieux du rendement grain des nouvelles obtentions (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Menad *et al.*, 2011 ; Meziani *et al.*, 2011, Nouar *et al.*, 2012 ; Adjabi *et al.*, 2014).

Les génotypes de blé dur se distinguent par leurs caractéristiques spécifiques dont la capacité de production, la qualité technologique et la réponse à la variation des

milieux. Ces caractéristiques génotypiques peuvent être facilement mises en évidence et mesurées dans un lieu donné. Les différences entre génotypes pour ces caractéristiques, sont d'ampleurs variables. Ainsi certains génotypes présentent des performances élevées dans certains lieux, mais faibles ou mauvaises dans d'autres, alors que d'autres génotypes présentent un comportement tout à fait inverse. Ceci conduit à un changement de l'ordre de classement, pour un génotype donné, selon les milieux.

Kadi *et al.*, (2010), rapportent pour l'orge (*Hordeum vulgare* L.) que l'effet dû aux milieux (dans le sens site x années) était plus prépondérant et représentait jusqu'à 80% de la variation totale de la variable rendement grain analysée. Le reste de la variation est partagé entre l'effet génotype (8%) et l'effet de l'interaction (12%). La réponse différentielle des génotypes aux milieux complique le travail du sélectionneur qui est supposé répondre à la demande des agriculteurs en matière d'augmentation des rendements, en leur fournissant des variétés performantes et de production régulière.

La stabilité du comportement des génotypes, face à la variation des lieux, est une caractéristique indispensable pour l'adoption par la grande culture des nouvelles obtentions (Benmahammed *et al.*, 2010). En effet les agriculteurs connaissent le milieu (sol, climat, itinéraire technique) dans lequel ils produisent et n'adoptent que les variétés dont les performances sont stables face à la variabilité interannuelle du climat de leur lieu.

Cette thèse se propose de répondre aux questions suivantes :

- (1) Quelles sont les caractéristiques qui ont changé chez les nouvelles obtentions variétales de blé dur (*Triticum durum* Desf), en termes de précocité au stade épiaison, hauteur de la végétation, rendement grain et sensibilité vis-à-vis de la variation climatique du milieu?

(2) Quelle est la dimension de l'interaction génotype x milieux rencontrée par la sélection du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les conditions pédoclimatiques des principales zones céréalières?

La thèse comporte trois chapitres. Le chapitre I est une revue bibliographique qui présente la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf), pose la problématique de l'interaction génotype x lieux, et fait le point des recherches traitant de l'interaction, notamment les méthodes utilisées. Le chapitre II est entièrement consacré à l'étude du comportement de trois variétés qui sont largement cultivées sur les hautes plaines orientales, en termes de performance et de sensibilité vis-à-vis de la variation climatique (pluie et températures) des milieux. Le chapitre III analyse l'interaction en utilisant la régression conjointe, l'AMMI et la méthode graphique GGE. La production scientifique générée par cette recherche est constituée de deux articles scientifiques qui sont :

- Nouar H., L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Zerargui, A. Benmahammed, H. Bouzerzour. 2010. Performances comparées des variétés de blé dur: Mohammed Ben Bachir, Waha et Boussalam dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture*. 54: 23-29.
- Nouar H., H. Bouzerzour, L. Haddad, A. Menad, T. Hazmoune, H. Zerargui 2012. Genotype x environment interaction assessment in durum wheat (*Triticum durum* Desf) using AMMI and GGE models. *Advances in Environmental Biology*, 6: 3007-3015.

CHAPITRE I- REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. IMPORTANCE DU BLE DUR (*Triticum durum* Desf.)

1.1. En Algérie

La céréaliculture est la spéculation prédominante de l'agriculture algérienne, elle s'étend sur trois millions d'hectares dans un système biennal dominant jachère –céréale (Féliachi, 2002). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une importante place dans l'économie nationale. Il couvre 1.3 millions d'hectares soit près de 42% des 3,2 millions ha consacrés à la céréaliculture (Fellahi *et al.*, 2013). En 1865, les superficies consacrées aux céréales étaient estimées à 2.5 millions d'ha. La variation de la production du blé dur au cours de la période 1867 à 1929 a été de 4.5 millions de quintaux obtenus en 1867 à 8.0 millions de quintaux obtenus en 1911 (Ducellier, 1930).

Ducellier (1930) mentionne qu'on était frappé par la proportion importante du blé dur et sa variabilité phénotypique comparativement au blé tendre (Figure 1). Ceci vient du fait que le blé dur était cultivé bien avant la colonisation, et en plus le climat semble bien lui convenir. Les rendements des variétés de blé dur les plusensemencées telles que Hedba, Mohamed Ben Bachir, Adjini, Belioni, Djazairi et Tounsi variaient de 3.5 à 10.3 q ha⁻¹, au cours de la période 1920 à 1929. En 1929, les superficies ensemencées portent 286 000 ha de blé tendre, 1 219 000 ha de blé dur et 1 431 000 ha d'orge, pour un total de 2 936 000 ha (Ducellier, 1930).

Actuellement la production nationale de blé dur est jugée insuffisante au regard des besoins du pays, en matière de semoule, quoiqu'elle ait connu une certaine amélioration comparativement à ce qu'elle était au siècle dernier. La production réalisée

ne permet de satisfaire que près de 35 % des besoins de la population. Au cours de la période 2000-2011, la production de blé dur a varié de 4 863 000 à 22 328 000 qx, avec une moyenne de 14 542 000 qx (Figure 2).

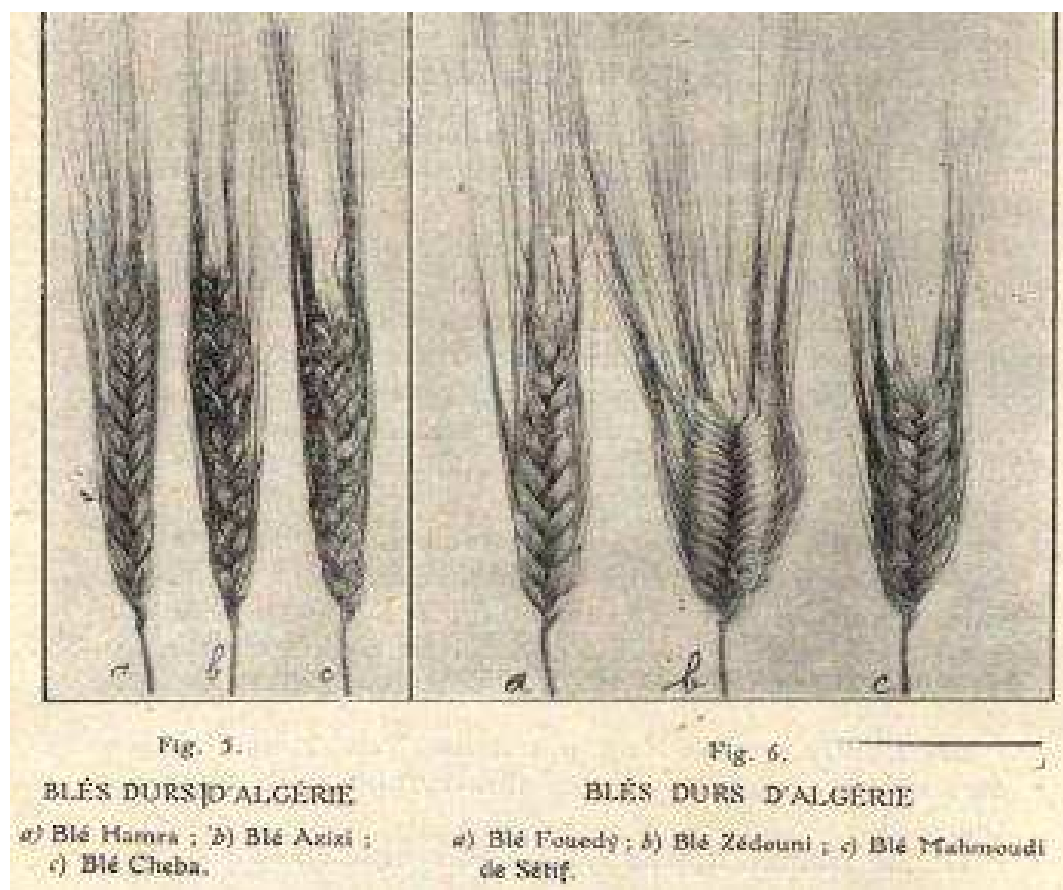


Figure 1. Variabilité des formes des épis des blés durs algériens (Ducellier, 1930).

L'Algérie se classe actuellement, parmi les grands pays consommateur de blé avec une moyenne dépassant largement les 230 kg/hab/an (Hervieu *et al.*, 2006). De ce fait, elle figure parmi les plus grands importateurs mondiaux de blé dur. En effet, les importations ont considérablement augmenté depuis 1991/92. Entre 1984/85 et 1990/91, la moyenne était inférieure à 1.4 millions de tonnes/an. Pour la période 2000-2011, elle passe à 2.3 millions de tonnes/an, ce qui représente plus que le tiers de l'offre mondiale. L'Union Européenne reste le principal fournisseur du pays, aussi bien pour le blé dur que pour le blé tendre (CIC, 2010).

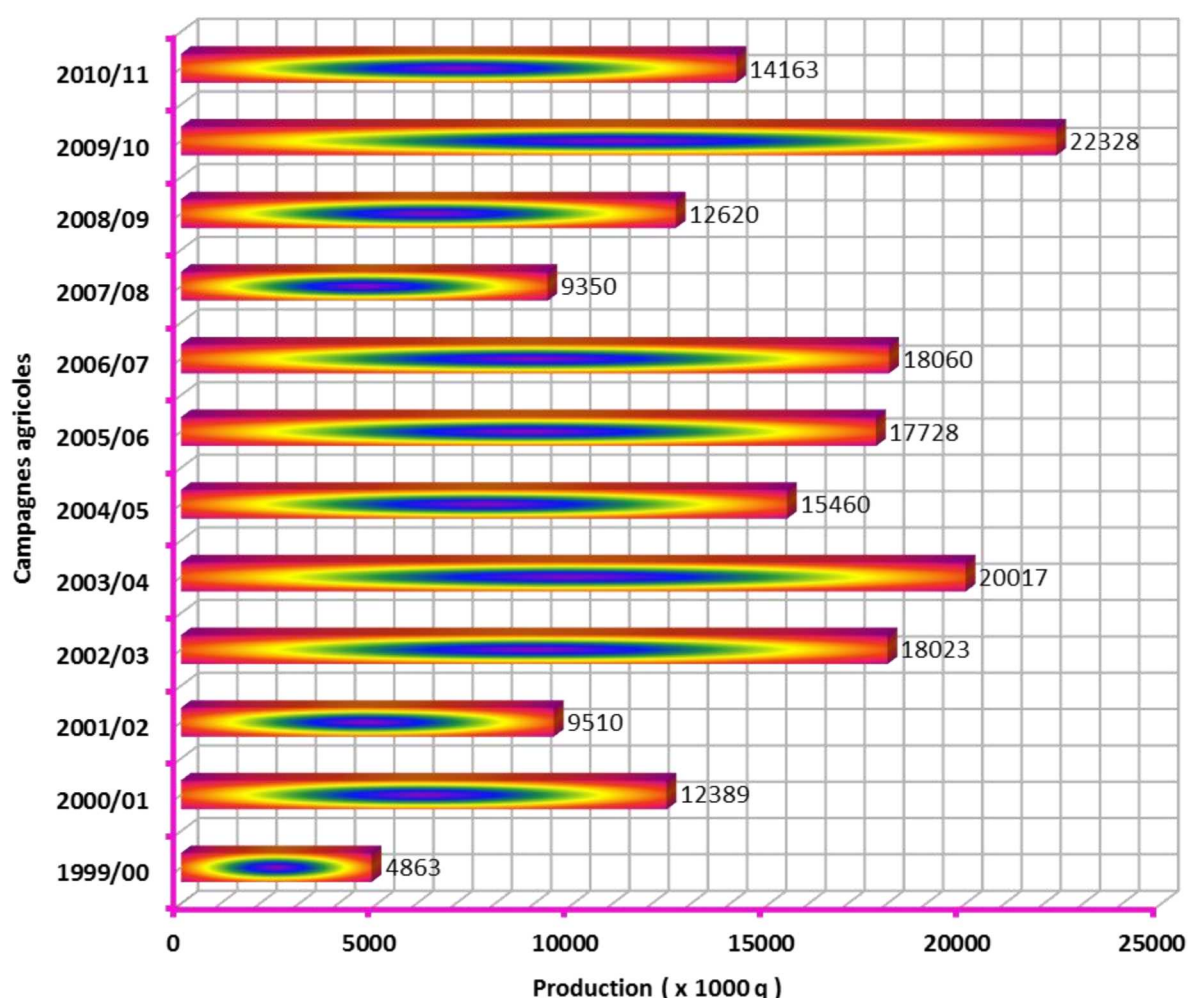


Figure 2. Evolution de la production (x1000 q) du blé dur (MADR, 2011).

1.2. Dans le monde

Le blé dur est relativement peu produit dans le monde, et sa production mondiale ne constitue, en moyenne, que 5% de la production totale des blés, au cours des dix dernières années, dont 20% sont commercialisés. Sept pays ont produit près de 80% des 27.7 millions de tonnes produits, en moyenne, entre 1999/2000 et 2003/2004 (Kellou, 2008). Avec une production de 8.1 millions de tonnes par an, moyenne de la période 1994-2005, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur (Figure 3). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4.6 millions de tonnes par an, suivi des États-Unis et de la Turquie, avec 2.67 et 1.99 millions de tonnes métriques,

respectivement (CIC, 2011). Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale.

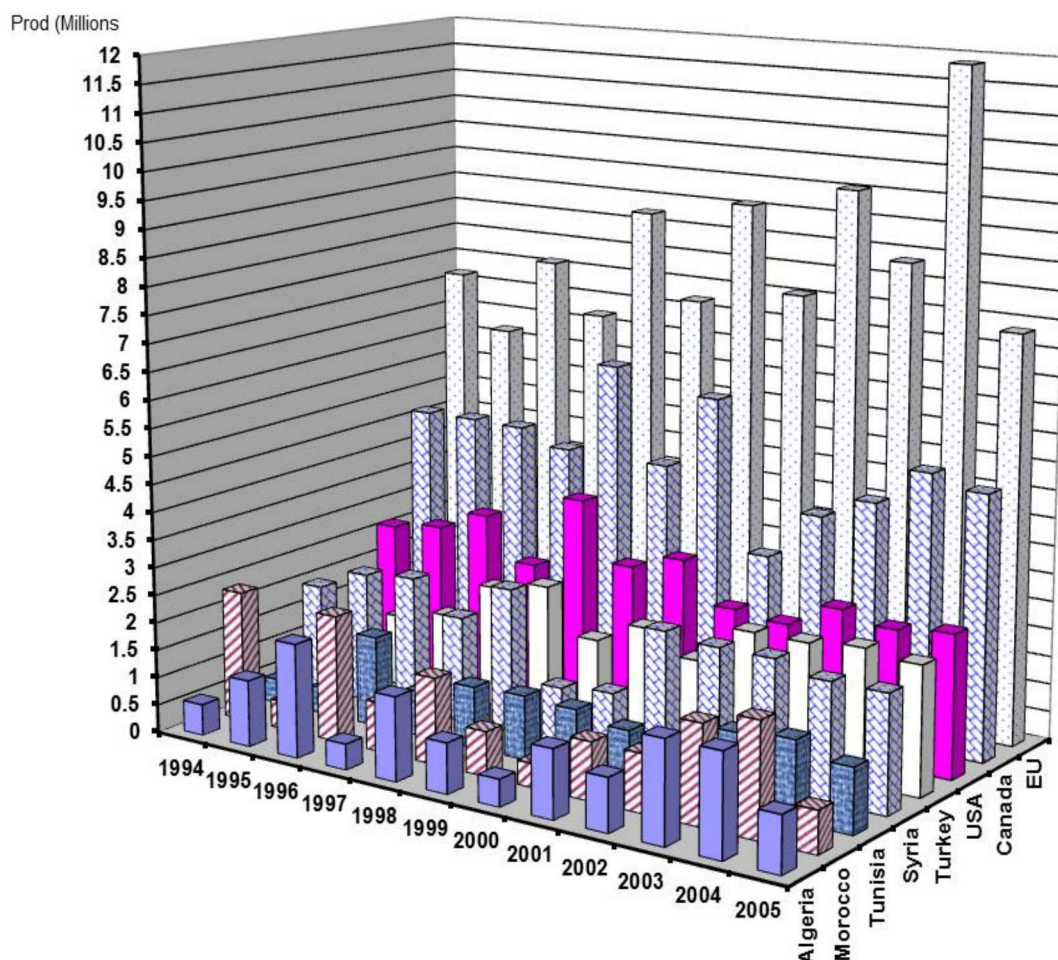


Figure 3. Evolution de la production ($\times 10^6$ q) des principaux pays producteurs de blé dur (Fao stat, 2007).

2. HISTORIQUE ET ORIGINE GENETIQUE DU BLE DUR

2.1. *Historique*

Durant la période du Néolithique, les premières cultures du blé furent à l'origine de bouleversements majeurs des sociétés humaines. L'homme pouvant désormais produire sa propre nourriture, sa survie devenait moins dépendante de son

environnement, ce qui lui permettait de se sédentariser (Harlan, 1975). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) tire son origine géographique du Croissant Fertile depuis 10.000 ans avant J.C. De là, il s'est répandu vers le sud-ouest de l'Europe, pour atteindre l'Afrique du Nord, autour de 7000 ans avant J.C. (Feldman, 2001). Actuellement, le blé dur est cultivé principalement dans les zones pluviales de la région méditerranéenne.

2.2. Origine génétique du blé dur

Selon Mckey (1968), l'origine génétique du blé dur remonte au croisement entre deux espèces ancestrales *Triticum monococcum* et une graminée sauvage du nom *Aegilops speltaoides*. Les études cytogénétiques montrent que les différents blés forment une série allo polyploïde avec un nombre chromosomique de base $X = 7$ (Feldman et al., 1995).

Les deux principales espèces de blés cultivées dans le monde, sont le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) de garniture chromosomique hexaploïde ($2n = 6x = 42$) et le blé dur (*Triticum durum* Desf.) de garniture chromosomique tétraploïde ($2n = 4x = 28$). Une certaine homologie est conservée entre ces différentes espèces apparentées, puisque les chromosomes hérités gardent plus ou moins leurs caractéristiques génomiques initiales (Ahn et al., 1993). Un des parents du blé dur, *Triticum monococcum* (einkorn) est encore cultivé au moyen orient, il coexiste avec les formes sauvages d'*aegilopoïdes* d'où il dérive, et avec qui il forme des hybrides fertiles (Johnson et Dhaliwal, 1976).

Selon Heun et al., (1997) *Triticum monococcum* dérivé par domestication de la sous espèce sauvage *Triticum monococcum ssp. Aegilopoïdes*, dans la région montagneuse de Karacadag, dans le sud de la Turquie. Des restes de ces espèces ont été trouvés dans les ruines datant de plus 7500 ans (Zohary et Hopf, 1993). Le second parent du blé dur tétraploïde, *Triticum urartu*, est largement présent en Arménie. Johnson et Dhaliwal (1976) montrent que les hybrides entre *Triticum monococcum* et

Triticum urartu sont entièrement stériles, ce qui confirme que *Triticum urartu* est une espèce biologique à part (Figure 4).

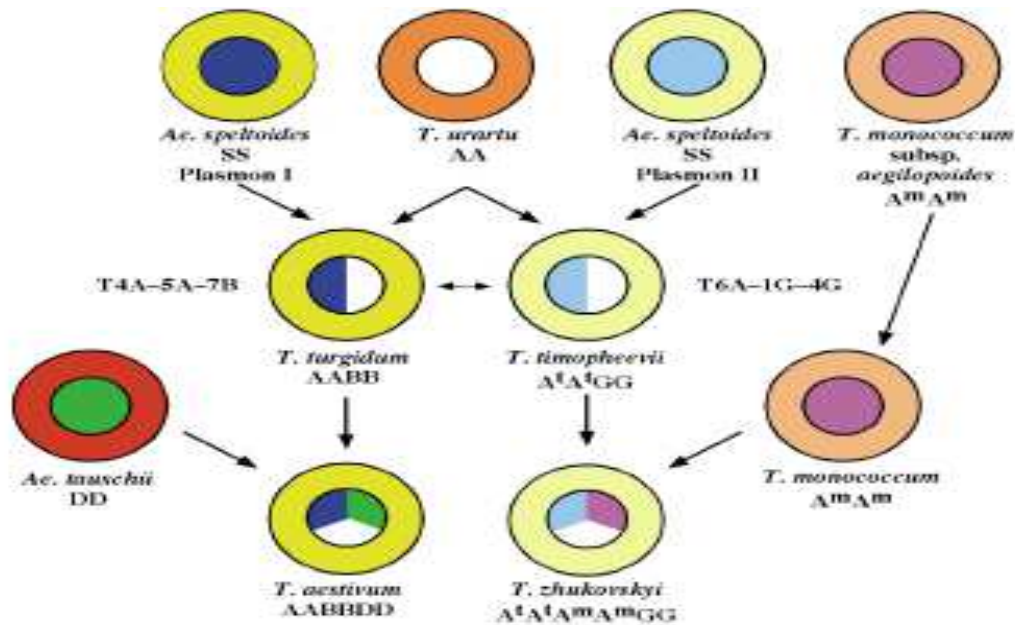


Figure 4. Phylogénie des espèces de blés (Feldman *et al.*, 1995).

Des études cytogénétiques montrent que le blé dur (*Triticum durum* Desf.) possède un génome nucléaire de 10 milliards de pb, organisé sous forme de 14 paires de chromosomes. La structure génomique des groupes de chromosomes A et B est essentiellement similaire à celle existante chez le blé tendre (Joppa, 1987).

3. BIOLOGIE ET CYCLE VEGETATIF DU BLE DUR

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une monocotylédone de la famille des Poaceae. C'est une plante annuelle de hauteur variant selon les variétés et le climat du milieu de 40 à 150 cm, en moyenne. Les feuilles comprennent un limbe rubané, une gaine correspond plus ou moins au pétiole de la feuille qui joue un rôle de soutien de la tige et une ligule qui est une expansion membraneuse se trouvant à la jonction du limbe et de la gaine. Les feuilles sont de couleur verte, jaunissant à maturité (Bozzini, 1988).

L'inflorescence du blé dur est un épi (Figure 5), muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entre-nœuds.



Figure 5. Variété de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stade maturité physiologique (Haddad, 2010).

Chaque épillet compte deux glumes, renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur est renfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure (lemma ou lemme) et la glumelle supérieure (paléa). Chacune compte trois étamines à anthères biloculaires, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux (Bozzini, 1988).

Le cycle de développement du blé dur est marqué par différentes phases végétatives. La germination du grain de blé dure entre 7 et 15 jours pendant lesquels le coléorhize sort de l'enveloppe du grain et donne une racicule d'où sont émises des racines primitives. La coléoptile sort du grain et forme un étui protégeant les premières

feuilles. L'axe portant le bourgeon terminal se développe en un rhizome dont la croissance s'arrête en dessous de la surface du sol (Henry et De Buyser, 2000).

Le développement des premières feuilles extérieures constitue la levée. Il apparaît un renflement dans la partie supérieure du rhizome qui grossit et forme le plateau de tallage. Le stade 3 feuilles est une phase repère pour le développement du blé. Des bourgeons se forment à l'aisselle des feuilles, donnant naissances des talles. Chaque talle primaire donne des talles secondaires. Apparaissent alors, à partir de la base du plateau de tallage, des racines secondaires ou adventives, qui seront à l'origine de l'augmentation du nombre d'épis (Henry et De Buyser, 2000).

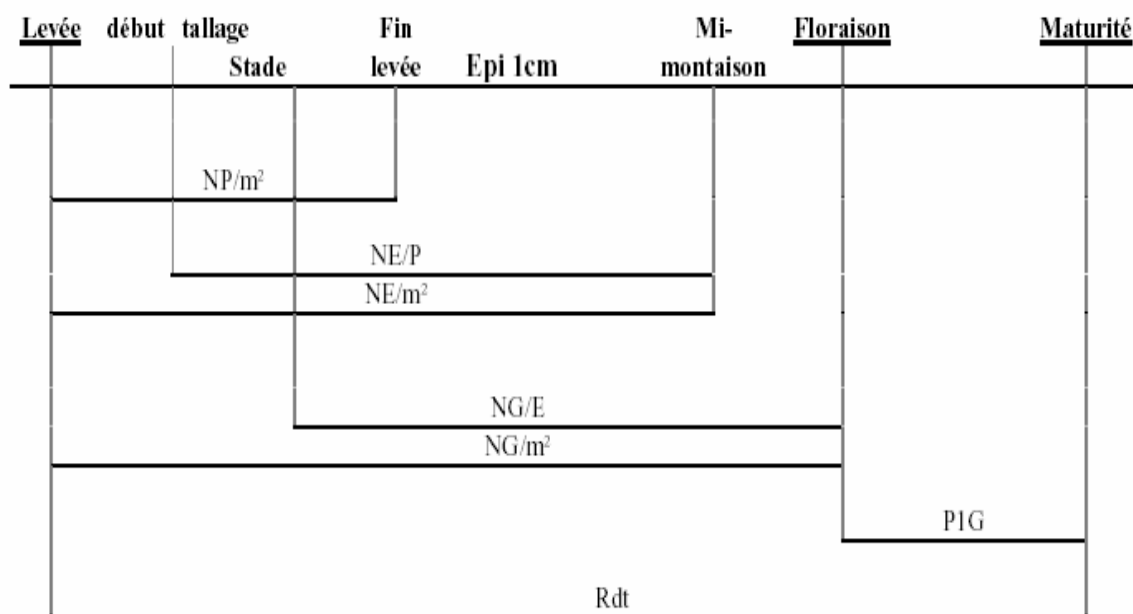
La montaison débute avec le développement de l'épi. Parallèlement, on assiste à l'allongement des entre-nœuds. Le gonflement correspond au développement de l'épi sous la gaine de la feuille drapeau. La floraison vient ensuite avec l'apparition des étamines en dehors des glumelles. Le cycle s'achève par la maturation qui dure en moyenne 30 jours (Henry et De Buyser, 2000).

4. ELABORATION DU RENDEMENT DU BLE DUR

Le matériel végétal, les pratiques agricoles, et les conditions environnementales interagissent pour déterminer le rendement. Parmi les variables environnementales, le stress hydrique est le principale facteur limitant le rendement des régions méditerranéennes (Bennet et *al.*, 1998 ; Royo et *al.*, 1998, Chennafi *et al.*, 2006). Le rendement est le produit de plusieurs caractères dit composantes du rendement qui s'élaborent successivement tout au long du cycle du blé (Figure 6).

La connaissance des liaisons qui existent entre les composantes permet de mieux identifier le ou les caractères à utiliser comme critère de sélection. Ces informations

permettent d'orienter le processus de sélection de manière à promouvoir les caractères capables d'engendrer une amélioration du rendement (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000). Assem *et al.*, (2006) mentionnent que le rendement chez le blé dur est dépendant du nombre d'épis, du nombre de grains par épi et du poids moyen du grain. Ces composantes s'élaborent au cours de phases bien définies (Figure 6).



Légende :
Stade A, ou stade double ride : début de la différenciation de l'épi sur la tige principale
NP/m² : Nombre de pieds par m²
NE/P : Nombre d'épis par pied
NE/m² : Nombre d'épis par m²
NG/E : Nombre de grains par épi
NG/m² : Nombre de grains par m²
PIG : Poids d'un grain
Rdt : Rendement

Figure 6. Phases de formation des différentes composantes du rendement (Meynard et David, 1992).

Bouzerzour *et al.* (1998) montrent que la contribution au nombre de grains/m² vient plus du nombre de grains/épi que du nombre d'épis/m² qui se forme en période plus favorable, chez l'orge. Simane *et al.*, (1993) remarquent que le nombre de grains/épi contribue plus directement au rendement chez le blé dur conduit en pluvial. Erchidi *et al.*, (2000) mentionnent que le rendement du blé est plus lié à la fertilité de l'épi qu'au poids moyen du grain. Ceci ne veut nullement dire que le nombre d'épis et le poids de

1000 grains ne jouent aucun rôle sous climat variable. La contribution indirecte de ces deux composantes, au rendement, est plus importante via le nombre de grains par épi que leur contribution directe (Bensemane *et al.*, 2011).

Sous les conditions de production de Sétif, le poids de 1000 grains se réalise en pleine période de stress intense. Le plus souvent, un poids de 1000 grains élevé est le résultat des effets de compensation qui s'instaurent entre le nombre de grains par épi et le poids individuel du grain. Selon Duggan et Fowler (2006), la compétition entre le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains explique une grande part de l'interaction et permet à certaines variétés d'ajuster leur rendement sous stress.

Sous stress abiotiques, les génotypes qui possèdent la capacité de transférer une partie des réserves stockées dans le col de l'épi vers le grain, font un meilleur rendement (Ehdaie *et al.*, 2006 ; Belkherchouche *et al.*, 2009). Les résultats obtenus par Gebeyehou *et al.* (1982) suggèrent qu'il est possible d'améliorer simultanément le taux du remplissage du grain et le poids du grain sans allonger la durée du remplissage du grain.

Simane *et al.* (1993) trouvent que tous les effets directs des composantes du rendement sont positifs, suggérant que, quand les autres composantes du rendement sont maintenues constantes, chaque effet direct aboutit à une augmentation du rendement.

Clarke *et al.*, (1991) mentionnent qu'une biomasse élevée à maturité est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique *et al.* (1989) soulignent qu'une biomasse élevée est la cause principale des rendements élevés enregistrés chez les variétés récentes. Un long cycle de développement est plus favorable à la production d'une biomasse aérienne élevée. Benmahammed *et al.*, (2004) indiquent que le poids de

la matière sèche de l'épi ou celui des épis/m², au stade épiaison, n'est d'aucune utilité dans la prévision du rendement final.

Dakheel *et al.*, (1993) notent que l'indice de récolte est positivement corrélé avec le rendement sous divers environnements. Richards (1987) remarque que l'indice de récolte sous conditions de croissance non limitantes, est de 50%, il chute à des valeurs de 35% dans les régions arides. Ce qui fait douter sur les possibilités que l'amélioration de cet indice engendre des augmentations du rendement sous stress hydrique. Ce rôle semble conditionné par la réalisation d'une biomasse aérienne élevée, dont il faut ensuite extraire le maximum sous forme de grains (Bouzerzour *et al.*, 1998).

5. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES DE LA PRODUCTION DU BLE DUR

5.1. Stress hydrique

Dans les zones semi-arides, la faiblesse et l'irrégularité des précipitations se traduisent souvent par une situation de contrainte hydrique qui est présente pratiquement tout au long du cycle de la culture. Le stress hydrique constitue un risque pratiquement présent à tous les stades de croissance et de développement de la plante et affecte par voie de conséquence, à divers degrés le rendement (Larbi *et al.*, 1998).

Debaeke *et al.*, (1996) mentionnent que le déficit hydrique précoce affecte la croissance des racines et des parties aériennes, ainsi que le développement des feuilles et des organes reproducteurs. Il engendre des pertes de rendement à n'importe quel stade de développement du blé. Il retarde la levée, provoque l'arrêt de l'émission de nouvelles talles, et accentue le taux de régression des talles montantes.

Le déficit hydrique à la montaison se traduit par la régression du nombre d'épis/m², la régression intense des talles et la diminution du nombre de grains par épi (Slama *et al.*, 2005). A la fin de la montaison, il réduit le nombre de fleurs fertiles par épillet (Debaeke *et al.*, 1996). 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 et la durée de remplissage (Bensemane *et al.*, 2004).

5.2. *Stress thermique.*

Abbassenne *et al.* (1998) observent une chute de la fertilité des épis des semis précoces qui est liée aux effets des basses températures au cours du stade gonflement. En régions méditerranéennes semi-arides, les gelées tardives de printemps affectent surtout les variétés précoces en pleine phase méiose-épiaison (Mekhlouf *et al.*, 2006). Les dégâts sur racines se manifestent particulièrement sur la croissance du rhizome (Abbassenne *et al.*, 1998).

Les hautes températures interviennent également comme une 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 (El Madidi et Zivy, 1993). Kirby (1985) note que l'effet des hautes températures au semis se matérialise par une réduction de la longueur de la coléoptile, et la plante ne peut pas s'ancrer en profondeur et devient très sensible aux effets du stress thermique. Fisher (1985) trouve que le stress thermique au cours de la phase levée réduit fortement la capacité de tallage de la plante.

Une température au-dessus de 30°C affectent le poids final du grain en réduisant la durée de remplissage du grain (Al Khatib et Paulsen, 1984 ; Jenner, 1991). Après la floraison, elle a des effets néfastes sur le stockage des assimilats et sur la qualité du

grain, à cause de l'échaudage. Hauchinal *et al.*, (1993) notent une réduction du rendement des semis tardifs, liée à une diminution du nombre d'épis et du poids moyen du grain, causée par les effets des hautes températures en fin de cycle.

6. MECANISMES D'ADAPTATION DE LA PLANTE AUX STRESS ABIOTIQUES

Turner (1979) définit l'adaptation comme la capacité de la plante à croître et à donner des rendements satisfaisants dans les zones sujettes à des déficits hydriques périodiques. Selon Abbassenne *et al.*, (1998), une variété adaptée est celle qui réagit positivement au bilan des variations pédoclimatiques pour donner un rendement final acceptable et stable à chaque récolte. Rejeb et Ben Salem (1993) notent que les variétés de céréales résistantes au déficit hydrique se caractérisent par une stratégie regroupant en même temps, un ensemble de mécanismes d'adaptation qui sont complémentaires, ils sont d'ordre phénologique, morphologique et physiologique.

6.1. Adaptations phénologiques

L'esquive permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique suite à l'ajustement du cycle de la culture à la longueur de la saison pluviale (Amigues *et al.*, 2006). La précocité constitue donc un important mécanisme d'esquive des stress de fin de cycle (Figure 7).

La précocité joue également un rôle très important dans la stabilité des rendements des blés dans les grandes plaines semi-arides, caractérisées par des températures excessives et des vents chauds et desséchants lors de la période du remplissage du grain (Sharma et Smith, 1986).

Dans les milieux où le gel tardif est une contrainte à la production céréalière, une précocité excessive n'est d'aucune utilité, au contraire, elle risque d'être une source d'instabilité des rendements en grains (Mekhlouf *et al.*, 2006). Une précocité modérée peut cependant constituer un avantage lors de la reprise de la croissance après un bref stress (Bouzerzour *et al.*, 1998).



Figure 7. Différence de précocité au stade épiaison chez le blé tendre (Rebetzke *et al.*, 2007).

6.2. *Adaptations morphologiques*

L'évitement représente la capacité du génotype à maintenir un statut hydrique élevé quand il est soumis aux stress. Dans le cas du stress hydrique, l'évitement est lié à la réduction des pertes en eau par fermeture partielle ou totale des stomates ou au maintien de l'absorption de l'eau, grâce à un système racinaire mieux adapté (Richards *et al.*, 1997). L'utilisation de l'eau est directement liée à l'indice foliaire qui s'établit au cours du cycle de la culture (Figure 8).



Figure 8. Différence de vigueur de la croissance précoce chez le blé tendre (Rebetzke *et al.*, 2007)

Pour un réservoir d'eau du sol donné, il faut chercher un développement de la surface foliaire qui rythme mieux la consommation d'eau par la plante pour conserver une partie afin d'assurer un remplissage adéquat des grains. Le statut hydrique foliaire des 20 jours avant et après l'épiaison est un indicateur de cette capacité génotypique (Araus *et al.*, 2002). Blum *et al.*, (1990) ne trouvent, cependant, aucune relation entre la surface foliaire, et le degré de résistance à la sécheresse. La réduction des dimensions des feuilles est compensée par une augmentation de leur nombre, avec un effet net nul sur la variation de l'indice foliaire.

Au stade floraison, la réduction de l'indice foliaire, sous stress hydrique, est largement due à une expansion foliaire affaiblie. Après ce stade, la réduction est essentiellement due à la sénescence progressive du feuillage (Blum, 1996). La sénescence foliaire est un mécanisme qui intervient au niveau de la plante entière pour

réduire de la transpiration, sous stress hydrique (contrôle non stomatique). Bensemane (2004) trouve des différences dans le rythme de sénescence de la feuille étandard après l'épiaison chez le blé dur.

La capacité de modifier la composition en chlorophylle des feuilles, mesurée par le rapport des chlorophylles de type a et b, a un effet sur la proportion de la lumière incidente. Un rapport faible est associée à une couleur verte foncée (plus de chlorophylle a) notée en début printemps, en présence de stress moins intense.

Dès que les conditions de croissance deviennent moins favorables, avec l'installation des stress, la plante reconvertie une partie de la chlorophylle a en chlorophylle b. Elle prend de ce fait une couleur moins foncée, permettant de réfléchir la luminosité reçue et par conséquence de réduire la température foliaire et la transpiration (Reynolds *et al.*, 1994, Hamblin *et al.*, 2014). La glaucescence foliaire est liée à la résistance à la sécheresse. Etudiant des lignées iso géniques pour ce caractère, Clarke *et al.*, (1989) montrent que les rendements biologiques et en grains des lignées glauques étaient significativement plus élevés que ceux des lignées non glauques, sous stress (Figure 9).

Le dépôt de la cire diminue la perméabilité de la cuticule et augmente l'albédo de la culture. Les lignées glauques ont une transpiration nocturne réduite, une transpiration diurne plus faible, pour un taux de photosynthèse donné, et une température du feuillage plus réduite. Les feuilles glauques réfléchissent une grande partie de la lumière reçue et restent en activité plus longtemps (Clarke *et al.*, 1989).

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). 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).



Figure 9. Glaucescence de la gaine et du limbe de la feuille étendard du blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Haddad, 2010).

Le système racinaire le plus efficace en conditions de stress hydrique est sujet à controverses. La résistance à la sécheresse est associée, selon Blum *et al.*, (1983), à la production de la masse racinaire. Monneveux et Nemmar (1986) trouve, en effet, que les génotypes résistants à la sécheresse ont un système racinaire très développé en surface et en profondeur, ce qui leur assure un bon approvisionnement en eau. Gregory (1989) préconise, par contre, un système racinaire épars, peu développé, qui assure la conservation de l'eau. Ce système doit pouvoir aller plus en profondeur pour puiser le

maximum d'eau disponible dans le profil cultural ont été conduites. Chaque environnement nécessite un système qui lui est spécifique (Passioura, 1983).

6.3. *Adaptations physiologiques*

Sous stress hydrique, la transpiration épidermique (ou résiduelle) définie comme la somme des transpirations s'effectuant par la cuticule et par les stomates incomplètement fermés, joue un rôle important (Belhassen *et al.*, 1996). Elle est caractérisée par la vitesse de déperdition de l'eau des feuilles excisées (Clarke *et al.*, 1989). Le rendement des génotypes à faible vitesse de déperdition de l'eau était de 40 à 150% plus élevé que celui des génotypes à vitesse de déperdition de l'eau élevé. Une faible vitesse de déperdition de l'eau contribue donc à améliorer le rendement en conditions pluviales.

L'ajustement osmotique apparaît aujourd'hui comme un mécanisme majeur d'adaptation des plantes au stress abiotique (Zhang *et al.*, 1999), il constitue un processus essentiel permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique (Turner, 1986), grâce à l'accumulation active de molécules particulières (Ford *et al.*, 1984). Les solutés responsables de l'osmorégulation sont essentiellement des acides organiques (l'acide malique), des acides aminés (proline, glycine-bétaine), des sucres solubles et certains constituants inorganiques tels que les sels de potassium et les nitrates (Richards *et al.*, 1997).

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 al.*, 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).

7. AMELIORATION DE LA TOLERANCE DU BLE DUR AU STRESS

Le développement des variétés tolérantes des stress a été toujours un important objectif pour les sélectionneurs et les physiologistes (Blum, 1985; Clarke *et al.*, 1994; Fischer et Maurer, 1978). Quoique la variation du rendement grain en réponse au stress, est généralement observée, le progrès en matière de tolérance est très lent suite à la complexité des effets des caractères qui sont liés à la tolérance (Johnson *et al.*, 1983 ; Jordan *et al.*, 1984).

Ainsi le ratio du rendement sous stress sur celui obtenu en absence de stress est utilisé comme un indice de la tolérance (Blum, 1988). Ceci conduit à préconiser la sélection concomitante sous stress et en absence de stress, pour identifier les génotypes performants et tolérants (Ceccarelli *et al.*, 1998, 2010).

L'information sur le contrôle génétique et le degré d'héritabilité des caractères liés à la tolérance, le plus souvent, manque (Morgan, 1984). Hanson *et al.*, (1979) mentionnent qu'il est possible de sélectionner pour la proline, les générations F₂ et F₃ d'un croisement fait entre deux variétés, l'une présentant des valeurs élevées pour le contenu en proline et l'autre de faibles valeurs, chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). Ces auteurs remarquent que la descendance, aux valeurs de proline élevées, se caractérise par des extrémités des feuilles desséchées. Kueh *et al.*, (1984) rapportent que le contenu en proline présente une hérédité simple, contrôlée par un faible nombre de gènes.

La génétique de l'ajustement osmotique est rapportée par Morgan (1991) qui fait observer que l'hérédité de cette caractéristique est simple et que la descendance peut être classées dans trois groupes à ajustement élevé, moyen et faible. Ces classes sont déduites de la ségrégation de la génération F₄ issue du croisement entre deux lignées qui diffèrent pour la capacité d'ajustement osmotique.

Robertson *et al.*, (1995) mentionnent que l'orge soumise au stress produit des protéines de type déhydrine. Ces protéines sous contrôle des gènes déhydrines chez le cultivar Himalaya. L'expression de ces gènes et leur interaction avec d'autres gènes reste à élucider.

8. ANALYSE DE L'ADAPTATION AUX STRESS ABIOTIQUES

L'amélioration génétique a eu pendant longtemps pour objectif l'augmentation de la productivité. Le succès de cette stratégie est lié à l'existence de conditions environnementales favorables, qui permettent ainsi l'expression des différents facteurs du rendement. En Algérie, le déficit hydrique est le facteur environnemental abiotique le plus fréquent et le plus limitant de la production.

L'obtention de variétés tolérantes au déficit hydrique passe par deux étapes successives: la création de la variabilité, suivie de la sélection de la diversité créée selon la diversité des conditions climatiques. Les réponses différentielles des génotypes à la variabilité des différents environnements sont connues comme des interactions génotype x environnements (Kadi *et al.*, 2010).

Les interactions génotype x environnements sont extrêmement importantes dans le développement et l'évaluation des variétés des plantes, car elles réduisent les valeurs de la stabilité et l'adaptabilité des génotypes à des environnements variables (Brantcourt-Humel *et al.*, 2005, Annichiarico *et al.*, 2010). L'étude de l'interaction génotype x environnements offre des opportunités de sélectionner des génotypes qui montrent une interaction positive dans certaines localités et sous certaines conditions environnementales spécifiques : génotypes à adaptation spécifique.

Comme elle offre aussi l'opportunité de sélectionner des génotypes caractérisés par un rendement au-dessus de la moyenne générale mais avec une faible variation inter sites: génotypes à large adaptation (Simmonds, 1991 ; Ceccarelli, 1996 ; Annichiarico *et al.*, 2006 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Menad *et al.*, 2011). L'analyse de la variance montre l'existence de l'interaction génotype x environnement mais ne fournit pas des informations suffisantes pour l'analyse des différences de réponses des génotypes aux variations environnementales. Plusieurs approches et modèles ont été développés pour l'analyse et l'interprétation de l'interaction génotype x environnements.

Finlay et Wilkinson (1963) étaient parmi les premiers à proposer une procédure basée sur la régression, pour lier les performances génotypiques à la variation des milieux. Cette approche a permis de classer des génotypes dans trois groupes : les variétés adaptées à des environnements favorables, les variétés adaptées à des environnements défavorables et celles tirent le meilleur de l'ensemble des environnements.

Le principal problème avec ce type d'analyses est qu'elles ne fournissent aucune information utile pour l'interprétation biologique de l'interaction génotype x environnements (Lacaze et Roumet, 2004). La notion d'adaptation est à replacer dans le contexte de l'interaction génotype x milieux. En effet la présence d'interaction se traduit par une variation de l'adaptation. Étudier l'adaptation d'un génotype revient donc à analyser son interaction génotype x milieux. Le sélectionneur peut rechercher des génotypes présentant une adaptation à des milieux spécifiques, ou au contraire une adaptation générale à des conditions de milieux variés (Annichiarico *et al.*, 2006).

Les méthodes statistiques les plus utilisées pour estimer l'adaptation sont fondées sur des analyses de la variance dérivées de la régression. L'adaptation générale

pourra être mesurée par un modèle très simple, la régression conjointe, tandis que l'adaptation spécifique pourra faire appel à des modèles plus ou moins sophistiqués telle la régression factorielle, ou l'AMMI (Additive Main effect Multiplicative Interaction ; Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005).

L'adaptabilité représente la stabilité dans l'espace alors que l'adaptabilité dans le temps est plutôt désignée par le terme de stabilité temporelle. La stabilité du rendement est un critère important pour le développement d'une variété (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997). La stabilité phénotypique caractérise l'importance des fluctuations du rendement observées pour un même génotype cultivé dans différents lieux.

Selon Lin *et al.*, (1986), un génotype présente une stabilité de type I, lorsque son rendement montre une faible variance due à la variation des milieux. Ce type de stabilité est aussi dit, selon Becker (1981), stabilité statique ou biologique.

Le concept de stabilité agronomique relève du type II. Ainsi, un génotype dont le rendement réagit parallèlement à la réponse moyenne des génotypes avec lesquels il est testé, présente une stabilité agronomique ou stabilité de type II. La stabilité de type III est définie par la qualité d'ajustement des données au modèle additif conduisant à une interaction génotype x milieux nulle.

Un génotype stable, dans ce sens, présente un faible écart par rapport à la régression sur l'index du milieu. Le coefficient de régression est une mesure de l'adaptation. Selon Becker (1981), la méthode de la régression peut être assimilée à une combinaison des concepts biologique et agronomique de la stabilité, dans la mesure où les coefficients de régression sont très bien corrélés aux variances du milieu (concept biologique) et que les déviations à la régression le sont très bien aux écovaleances (concept agronomique).

La stabilité de type IV, définie par Lin et *al.*, (1988), fait intervenir le facteur temps. La variation du milieu est séparée en une composante prévisible due à l'interaction génotype x milieu et une composante imprévisible due à l'interaction génotype x années. Cette dernière permet une mesure de la stabilité ou de la capacité d'un cultivar à résister à des variations imprévisibles qui sont en effet causées par les effets années (Brancourt-Hulmel et *al.*, 1997, Kadi et *al.*, 2010). Ce type de stabilité est rattaché aussi à la stabilité agronomique ou dynamique.

La méthode AMMI est un modèle d'analyse qui décompose l'interaction génotype x milieux en une somme de termes multiplicatifs, chaque terme étant le produit d'une valeur caractérisant les génotypes et d'une valeur caractérisant les environnements (Brancourt - Hulmel et *al.*, 1997). En outre, cette méthode explique une plus grande partie de l'interaction, en séparant les effets dus au comportement génotypique (pattern) des effets dus à l'erreur dit bruit de fond (noise) (Zobel et *al.* 1988; Gauch et Zobel, 1996). Les résultats sont présentés graphiquement dans un biplot très instructif qui montre les effets génotypes et environnements et leurs interactions.

La régression conjointe a été intensivement employée en génétique, en sélection des plantes et en agronomie pour déterminer la stabilité des rendements de différents génotypes ou d'autres caractères agronomiques. La part d'interaction expliquée est en général très faible (Brancourt-Hulmel et *al.*, 1997 ; Kadi et *al.*, 2010 ; Menad et *al.*, 2011). De plus, l'interprétation des résultats est limitée, car on ne sait pas relier la part expliquée de d'interaction à des caractéristiques du milieu autres que milieux à faible ou à potentiel élevé. De plus, on ne peut décrire les génotypes que par une estimation de leur stabilité ou par leur aptitude à bien ou mal valoriser les potentialités des milieux (Benmahammed et *al.*, 2010).

Résumé : La présente étude a été conduite au cours de sept campagnes agricoles sur le site expérimental de l'ITGC de Sétif. Les résultats montrent l'avantage des variétés Waha et Bousselam comparativement à MBB. En années difficiles, ces deux variétés réussissent à faire des rendements équivalents à ceux de MBB. En années favorables, elles expriment des performances plus élevées, contrairement à MBB qui valorise moins le milieu. Le gain de rendement moyen est de 16.6% du rendement moyen de MBB pour Waha et 24.5% pour Bousselam. L'étude de la réponse à la variation climatique des trois variétés de blé dur montre que les composantes du rendement sont différemment affectées, ainsi en année froide c'est le rendement de MBB qui varie, en année chaude c'est celui de Waha et en année sèche c'est celui de Bousselam.

Mots clés : *Triticum durum*, performance, gain de rendement, interaction, réponse.

Abstract: The present study was conducted during a seven-year period at the Sétif ITGC experimental site. The objective was to compare yield performances of three durum wheat varieties MBB, Waha and Bousselam. The results showed the yield advantage of Waha and Bousselam over MBB. During harsh years, these two varieties were able to achieve grain yield levels similar to those exhibited by MBB. Under favourable growing conditions these two genotypes expressed higher yields, than MBB. Waha presented a mean genetic gain of 16.6% and Bousselam showed an average of 24.5% of MBB grain yield. The response of the three durum wheat varieties to climate variation showed that yield components were differentially affected, and that grain yield of MBB decreased during cold years, the one of Waha decreased during warm years and during dry years, grain yield of Bousselam is the mostly affected.

Key words: *Triticum durum*, performance, yield gain, interaction, response.

INTRODUCTION

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) est une culture traditionnelle en Algérie. Ducellier (1930) signalait la grande variabilité phénotypique et la prépondérance des emblavements de cette espèce, au côté de l'orge (*Hordeum vulgare* L) à la fin du 19^{ème} siècle et la rareté du blé tendre qu'il qualifie d'introduction coloniale. La grande variabilité phénotypique se reflète dans le grand nombre de mélanges ensemençés à travers le territoire, d'où découle la description d'une trentaine de variétés, dont certaines sont encore largement cultivées, actuellement tels que Mohamed Ben Bachir, Hedba₃, et Bidi₁₇ (Ducellier, 1930 ; Hazmoune *et al.*, 2002 ; Zaghoulane *et al.*, 2006).

L'ensemble de ces variétés est classé dans le groupe *Mediterraneum typicum* par Grignac (1965) en comparaison avec le groupe *Syriacum typicum* dont elles se distinguent notamment par la hauteur du chaume, la longueur des barbes, la durée du cycle et la longueur du système racinaire, qui sont plus importantes chez le groupe *Mediterraneum typicum* (Bozzini, 1970 ; Ali Dib et Monneveux, 1998).

Les premières tentatives d'amélioration de la production des céréales en générale et celle du blé dur en particulier virent le jour au début des années 1970, avec la création du projet céréales, en collaboration avec le Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (Cimmyt), positionné au Mexique. Ce projet mise sur la sélection à l'intérieur des populations en ségrégations en provenance de Cimmyt et l'évaluation des lignées avancées, plus ou moins fixées (Hachemi, 1979).

Cependant les efforts furent orientés plus vers le blé tendre dont les premières variétés à haut rendement, telles qu'Anza, Inia₆₆, Tobari et 7Cerro furent introduites en grande culture (Bouzerzour *et al.*, 1990). De 1970 à 1980, la carte variétale du blé dur

connait peu de changement et reste dominée par les variétés locales. Mexicali⁷⁵ et Joric⁶⁹ figurent parmi les premières variétés à hauts rendement introduites de Cimmyt. Elles furent adoptées au niveau des plaines intérieures et le littoral, suite à leur grande sensibilité au gel, plus fréquent sur les hauts plateaux.

Le début des années 1980 connut des changements importants du point de vue activités de sélection du blé dur, notamment suite à la création du Centre International de l'Icarda, en Syrie, dont le mandat couvre l'Afrique du Nord et le Moyen Orient. A partir de cette date, les programmes nationaux de sélection de blé dur, de blé tendre et d'orge connaissent un certain équilibre. Des croisements sont réalisés localement en plus de l'introduction du matériel en ségrégation et fini de l'Icarda et de Cimmyt (Benmahammed *et al.*, 2001).

Plusieurs variétés performantes ont été identifiées, parmi lesquelles Waha, dont le croisement d'origine est Plc/Ruff//Gta/Rtte, qui a connu une large adoption par la grande culture, occupant d'importantes superficies. Plus récemment, une nouvelle variété de blé dur vient de connaître un début d'adoption dans les régions de Tiaret et de Sétif, il s'agit de Bousselam, dont le croisement d'origine est Heider/Martes//Huevos de Oro, une sélection de l'ITGC de Sétif. Cette nouvelle variété occupait un classement honorable dans les essais multi sites (Annichiarico *et al.*, 2005).

La comparaison entre les variétés anciennes et les nouvelles variétés est généralement utilisée pour identifier les caractères qui ont conduit à l'augmentation du rendement (Evans et Fischer, 1999). Tout progrès génétique en matière de rendement peut être obtenu suite à l'amélioration du potentiel génétique et/ou à l'amélioration de la résistance vis-à-vis des stress aussi bien biotiques qu'abiotiques. Le potentiel est approché sous conditions optimales, alors que la recherche de la résilience vis-à-vis des stress l'est sous conditions de contraintes (Sayre *et al.*, 1995; Cooper *et al.*, 1996).

En effet le rendement potentiel peut être défini comme étant le rendement du génotype adapté obtenu en absence de tous facteurs limitants (eau, N, P, maladies, verse, date de semis). L'absence de l'interaction génotype x milieux est aussi considérée (Evans et Fischer, 1999). Ainsi par exemple un semis précoce désavantage les génotypes récents, alors que le semis tardif est à leur avantage, dans l'évitement du gel printanier (Mekhlouf *et al.*, 2006).

Mohammed Ben Bachir (MBB) est une sélection des services de la recherche agronomique datant des années cinquante du siècle dernier, sélection faite à l'intérieur d'une population locale de la région de Ain Roua (Nord de Sétif), et multipliée à la station annexe de Ouled Hamla (Laumont et Erroux, 1961). Cette variété occupe encore, une grande partie de la sole réservée au blé dur dans les wilayas de Sétif et Tiaret.

Plusieurs études montrent les faibles performances de MBB, suite à la longue durée de sa phase végétative, qui lui fait subir les effets des stress de fin de cycle (Mekhlouf *et al.*, 2006), sa mauvaise répartition de la matière sèche produite entre le grain et la biomasse aérienne accumulée (Bahlouli *et al.*, 2005), et sa faible valorisation des apports d'eau de complément (Chennafi *et al.*, 2006). Cependant Bahlouli *et al.*, (2008) mentionnent que MBB transfère plus d'assimilats vers le grain sous la contrainte hydrique de fin de cycle. L'objet de la présente contribution est :

- (i) d'analyser le comportement de ces trois variétés,
- (ii) d'estimer le gain génétique apporté par l'adoption de Waha et de Bousselam relativement à MBB et
- (iii) d'identifier les facteurs climatiques auxquels le rendement et les composantes du rendement de ces variétés montrent de la sensibilité.

MATERIEL ET METHODES

1. *Matériel végétal et site expérimental*

Les trois variétés concernées par l'étude sont Mohamed Ben Bachir (MBB), Waha et Bousselam. Elles ont été évaluées aux cours des campagnes agricoles 2000/01 à 2005/06 et en 2008/09, sur le site expérimental de la Station Expérimentale Agricole (SEA) de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif. Le site expérimental est situé aux coordonnées géographiques 36° 08' N, 5° 20' E, à une altitude de 1081 m au-dessus du niveau de la mer (Annichiarico *et al.*, 2005). Le climat du site expérimental est de type méditerranéen, continental, semi-aride, caractérisé par un été chaud et sec, et un hiver froid et humide. Le sol est de type brun calcaire, argileux limoneux, avec présence d'encroûtements au-delà des 40 cm de profondeur (FAO, 1990). La teneur en matière organique est de 1.4% en surface, et décroît rapidement, en profondeur pour atteindre des valeurs inférieures à 1 % (Kribaa *et al.*, 2001).

2. *Dispositif expérimental*

Les génotypes faisant l'objet de l'étude sont mis en place dans un dispositif en blocs avec trois répétitions sur des parcelles élémentaires de 6 m² (5 m de long x 1.2 de large). Les techniques culturales appliquées sont celles préconisées par l'ITGC. Le semis est réalisé après le 15 novembre à une densité de 250 graines par m². L'essai est fertilisé avec 100 kg ha⁻¹ d'engrais phosphaté à 46 % avant le semis et avec 75 kg ha⁻¹ d'engrais azoté (urée à 35 %) au stade tallage. Le contrôle des mauvaises herbes est fait chimiquement avec du GranStar (*Tribenuron méthyle*) à raison de 12 g ha⁻¹.

3. *Suivi et notations*

Les notations ont porté sur la détermination :

- de la durée de la phase végétative, notée en jours calendaires de la levée à la date d'épiaison.
- La hauteur de la végétation est mesurée en cm au stade maturité.
- Les composantes du rendement grain ont été déterminées à partir de la végétation provenant de la fauche d'un segment de rang long de 1 m :
 - Le nombre d'épis (NE) est déterminé par comptage sur 1 m linéaire et ramené au m²
 - Le poids de 1000 grains (PMG) est estimé sur la base du comptage et le poids de 250 graines.
 - Le nombre de grains par m² (NGM²) est déduit par calcul à partir du rendement grain (RDT, g m⁻²) et du poids de 1000 grains (PMG, g) :
- $NGM^2 = 1000 \times RDT / PMG$
 - Le nombre de grains par épi est estimé par le rapport entre le nombre de grains par m² et le nombre d'épis :
- $NGE = NGM^2 / NE$
- Le rendement grain (RDT) est mesuré suite à la récolte mécanique de l'essai.
- Les données climatiques ont été compilés du site <http://tutiempo.com> et portent sur :

- Le cumul pluviométrique mensuel
- Les températures moyennes mensuelles
- La moyenne mensuelle des températures maximales,
- La moyenne mensuelle des températures minimales,
- Le nombre de jours dont la température est égal ou supérieure à 25°C,
- Le nombre de jours dont la température minimale est égal ou inférieure à 0°C,
- Le nombre de jours dont la pluie enregistrée est égale ou supérieure à 10 mm, et
- Le cumul de la pluviométrie enregistrée au cours du cycle de la culture (semis- récolte).

4. *Analyse des données*

Les données obtenues ont été soumises à une analyse de la variance à deux facteurs étudiés : années et génotypes et un facteur contrôlé : les blocs, en utilisant le logiciel Cropstat 7.2.3 (2008). Le modèle additif de l'analyse de la variance est le suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + C_j + (C \times B)_{jk} + G_i + (C \times G)_{ij} + \varepsilon_{ijk},$$

Où Y_{ijk} = valeur de la variable mesurée chez la variété i de la campagne j et du bloc k

μ = moyenne générale de l'essai pour la variable analysée

C_j = effet de la campagne j

$(C \times B)_{jk}$ = blocs hiérarchisés aux campagnes

G_i = effet de la variété i

$(C \times G)_{ij}$ = interaction variété i avec la campagne j

e_{ijk} = résiduelle du modèle

Le squelette de la table de l'analyse de la variance montrant le test des effets et les espérances moyennes est donné au tableau 1, suivant McIntosh (1983) pour un modèle où l'effet des campagnes est randon et celui des génotypes est fixé.

Tableau 1. Table du modèle additif de l'analyse de la variance adoptée (McIntosh, 1983).

Sources	ddl	CME	Test F	Espérances moyennes
Campagne (C)	c-1	Mc	$Mc/M_{(c \times B)}$	$\sigma^2_e + g\sigma^2_{r(c)} + rg\sigma^2_c$
Rep(Camp)	c(r-1)	$M_{(c \times b)}$	$M_{(c \times b)}/Me$	$\sigma^2_e + g\sigma^2_{r(c)}$
Génotype (G)	g-1	Mg	$Mg/M_{(c \times g)}$	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{(c \times g)} + rc\sigma^2_g$
C x G	(c-1)(g-1)	$M_{(c \times g)}$	$M_{(c \times g)}/Me$	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{(c \times g)}$
Erreur	c(r-1)(g-1)	Me	--	σ^2_e

Les coefficients de corrélation sont calculés avec le logiciel Openstat (Miller, 2012). La formule de calcul du coefficient de corrélation est :

$$r = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right)$$

Le test t utilisé pour déterminer la signification des coefficients de corrélation est déterminé par la formule suivante attribuée à Student par Steel et Torrie (1982) :

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

La valeur calculée du t est à comparer au t de table avec n-2 degrés de liberté.

L'analyse de la régression progressive est faite avec le logiciel Openstat (Miller, 2012). Le principe de l'analyse de la régression progressive ou pas à pas est de choisir parmi les n variables indépendantes, le plus petit nombre d'entre elles qui explique au mieux la variabilité de la variable dépendante Y. Par itération, la variable indépendante qui explique une grande part de la variation de la variable dépendante Y, mesurée par le coefficient de détermination (R^2), est retenue.

Parmi les n-1 variables indépendantes restantes, le modèle retient celle qui améliore le R^2 précédant et qui réduit de la résiduelle de l'analyse de la variance de la régression. Ainsi de suite, toutes les variables indépendantes sont testées et seules celles qui apportent un plus à l'explication de la variable dépendante Y sont retenues dans le modèle de la régression progressive (Draper et Smith, 1966).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. CONDITIONS CLIMATIQUES: PLUIE ET TEMPERATURE

1.1. *La température moyenne*

La température moyenne mensuelle accuse les valeurs les plus faibles en hiver, généralement aux mois de décembre, janvier ou février, et les valeurs les plus élevées au cours des mois de l'été (Figure 10). Pratiquement à partir du mois de novembre jusqu'au mois de mars parfois au mois d'avril, soit durant près de 5 mois, la température moyenne est inférieure au seuil de 10°C.

Ces conditions climatiques sont peu favorables au développement et à la croissance de la végétation (Figure 10). On note aussi que durant une année sur les sept il y a un retour du froid au mois de mai relativement à la température moyenne du mois d'avril, suggérant un effet du gel printanier qui caractérise la région (Figure 10).

1.2. *La pluviométrie*

La distribution de la pluviométrie est doublement variable. La variation est notée pour les moyennes mensuelles dont les valeurs changent d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre. Ainsi le mois de septembre a accumulé les valeurs variant de 4.3 à 47.3 mm, au cours des sept campagnes de l'étude (Figure 11). Les mois les plus pluvieux sont tantôt septembre, décembre, janvier ou mai, enregistrant de quantités variant de 47.0 à 118 mm.

Les mois, les plus secs, sont ceux de l'été et parfois les mois de mai et de septembre, avec une absence complète de pluie (Figure 11). La variation est notée aussi pour le cumul du cycle cultural qui varie de 215.9 mm, enregistré au cours la campagne 2001/02 à 521.9 mm, cumul de la campagne 2002/03 (Figure 11).

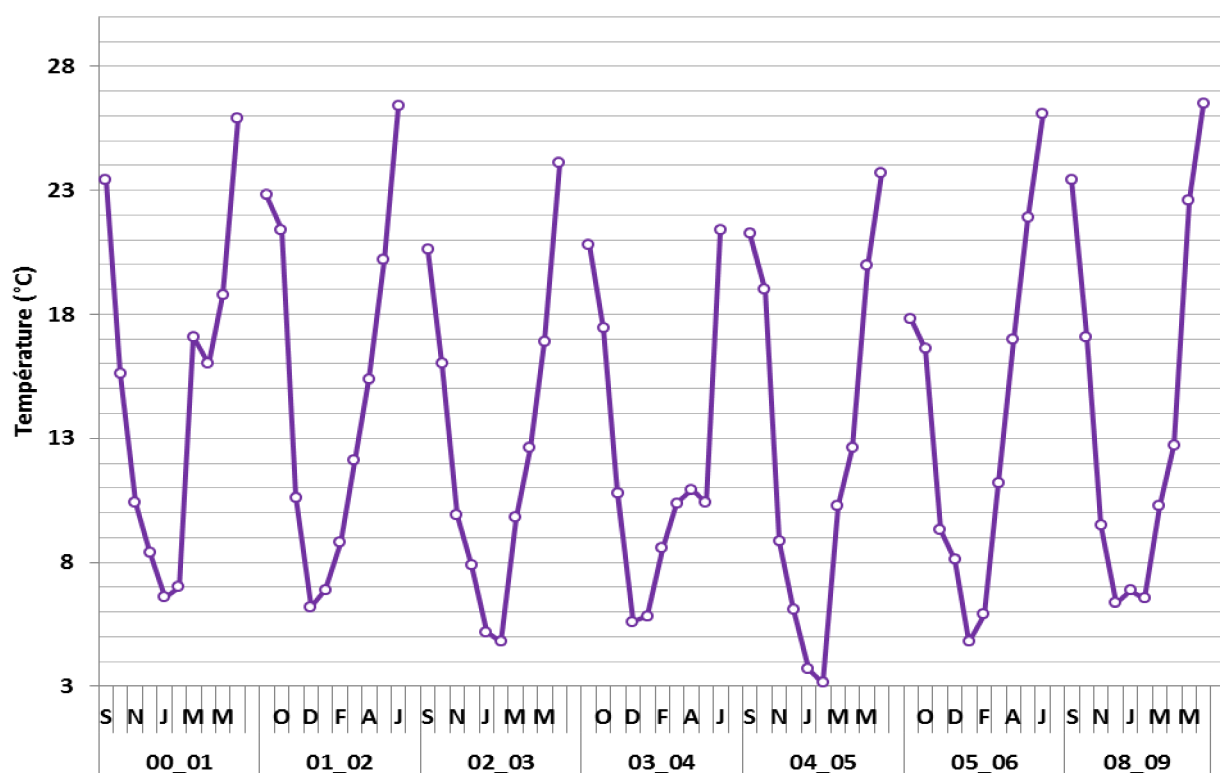


Figure 10. Variation de la température moyenne mensuelle des sept campagnes d'étude.

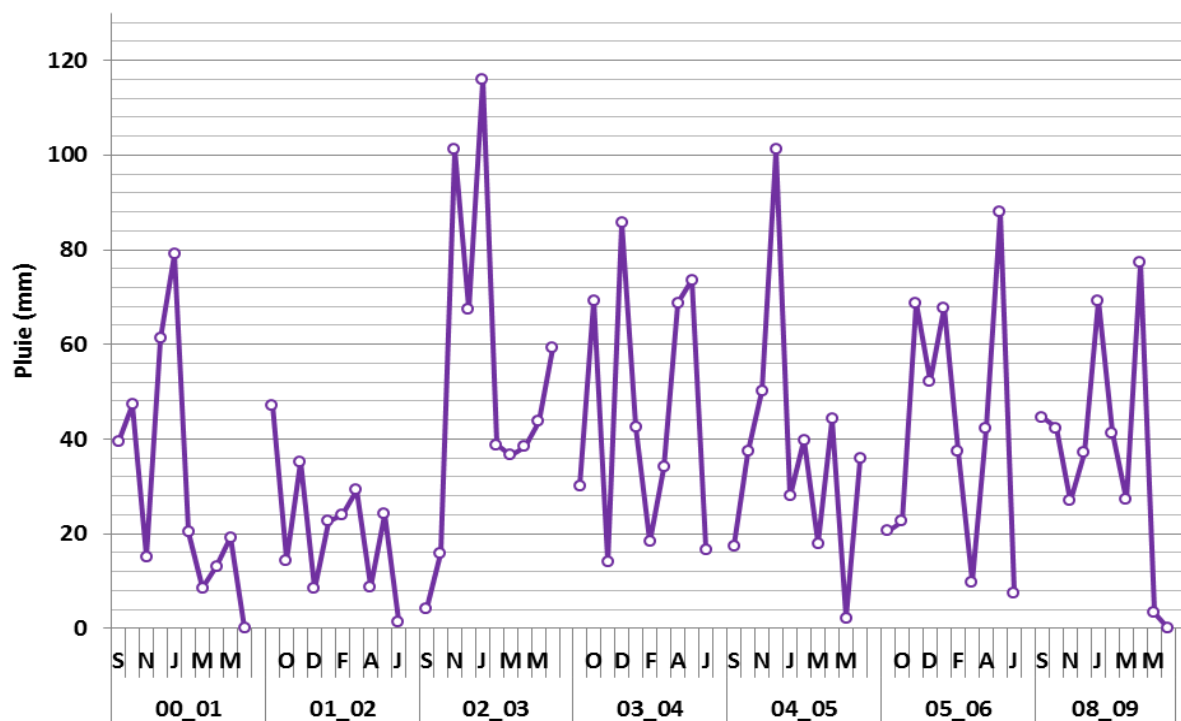


Figure 11. Variation de la pluviométrie mensuelle des sept campagnes d'étude.

De manière générale, l'essentiel de la pluviométrie est enregistré au cours de la période froide (Figures 10 et 11).

2. COMPORTEMENT VARIETAL

2.1. Etude de la variation des caractères agronomiques des 3 géotypes

2.1.1. Le rendement et ses composantes

L'analyse de la variance montre un effet campagne hautement significatif pour le rendement et les composantes du rendement grain, suggérant que les différences entre campagnes sont de loin les plus importantes en valeurs comparativement aux différences entre géotypes (Tableau 2). Les moyennes du rendement grain par campagne varient de 162.3 à 369.4 g m⁻², soit une variation de 100 à 227.6 % (Tableau 3).

Tableau 2. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée des variables mesurées au cours des 7 campagnes agricoles sur les trois géotypes.

Source	Ddl	RDT	NGM ²	PMG	HT	NGE	NE	PREC
Env (E)	6	55401**	522056**	118**	382.0**	279**	23036**	226**
Rep/E	14	223 ^{ns}	20833 ^{ns}	2.08 ^{ns}	3.81 ^{ns}	1.8 ^{ns}	211 ^{ns}	4.17**
Gen (G)	2	21010 ^{ns}	16241 ^{ns}	1.12 ^{ns}	1874.0**	87.3 ^{ns}	626 ^{ns}	479.3**
G x E	12	9733**	823711**	8.85*	103.4**	25.0**	5629**	8.9*
Erreur	28	230.7	38981	4.01	9.0	3.6	249.4	3.9

Env= environnement, Gen = géotype, Rép/Env = blocs hiérarchisés dans les environnements, RDT = rendement grain (g m⁻²), NGM² = nombre de grains m⁻², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m⁻², PREC= durée de la phase végétative (du 1 janvier à l'épiaison, en jours) ; ns,*,** = effet non significatif et significatif au seuil de 5 et 1% respectivement.

Les moyennes du nombre de grains produit par m², des différentes campagnes, varient de 4355.0 à 9962.0 grains m⁻². Le nombre d'épis par m² varie de 333.1 à 472.7, le nombre de grains par épi de 11.1 à 27.9 et le poids de 1000 grains de 33.7 à 44.2 g

(Tableau 3). La variation du rendement grain est peu liée au cumul pluviométrique enregistré au cours de la période couvrant la durée du cycle de la culture, allant du mois de septembre au mois de juin ($r = 0.038^{ns}$). En effet, avec un cumul de 215.9 mm, la campagne 2001/02 se caractérise par un rendement équivalent à celui de la campagne 2002/03, qui a enregistré le cumul le plus élevé de 521.8 mm.

Inversement, pour des cumuls pluviométriques assez proches, les campagnes 2003/04 (453.3 mm) et 2005/06 (416.3 mm) réalisent des rendements très différents (Figure 12). Cette source de variation est imprévisible et inévitable, pouvant générer des interactions génotype x campagnes. La sélection doit donc tenir compte de cette source de variation pour identifier des génotypes résilients qui en minimisent l'effet (Kadi *et al.*, 2010 ; Meziani *et al.*, 2011).

Tableau 3. Effet moyen campagne des variables mesurées

Année	RDT	NGM ²	PMG	HT	NGE	NE	PREC
2000/01	294.1	8471.1	34.8	65.5	20	422.2	119.7
2001/02	337.1	9699.3	34.8	69.7	27.9	351.4	120.1
2002/03	339.4	9962.4	33.7	69.7	21.8	450.5	127.5
2003/04	369.4	9413.5	39.8	71.1	19.9	472.7	120.8
2004/05	162.3	4355	37.5	60.3	11.1	393.9	122.3
2005/06	195.3	4432.7	44.2	62.8	13.3	333.1	123.9
2008/09	312.1	8310.7	37.6	98.5	19.8	421.2	133.6
M. G.	287.1	7806.4	37.5	71.1	19.1	406.4	123.9
Ppds _{5%}	15.1	461.5	1.5	2.9	1.4	14.7	2.1

NGM² = nombre de grains m⁻², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m⁻², PREC= durée de la phase végétative (du 1^{er} janvier à l'épiaison, en jours).

L'effet moyen génotype, testé relativement à l'interaction, n'est pas significatif pour le rendement et les composantes du rendement (Tableaux 2 et 4). Ceci suggère que le meilleur génotype pour le rendement et les composantes est variable selon les campagnes (Tableaux 2 et 4). Les moyennes des différents génotypes, calculées sur les 7 campagnes, varient de 252.5 à 314.4 pour le rendement grain ; de 6823.3 à 8518.2 pour le

nombre de grains par m² ; de 37.3 à 37.7 pour le poids de 1000 grains ; de 16.9 à 20.9 pour le nombre de grains par épi et de 400.5 à 411.3 pour le nombre d'épis par m² (Tableau 4).

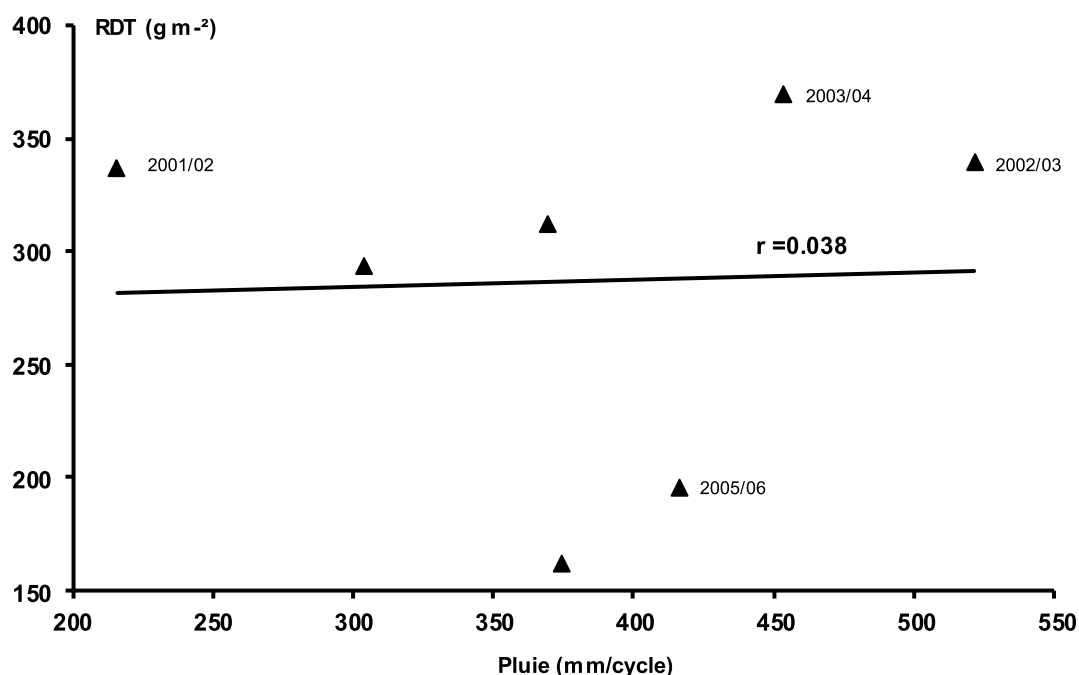


Figure 12. Relation entre le rendement grain par campagne et le cumul pluviométrique du cycle de la culture.

Les performances de rendement grain des différentes variétés par campagne sont aussi variables (Tableaux 2 et 4, Figure 13). Lors des campagnes 2002/2003, 2004/05 et 2005/06, la variété Bousselam s'est montrée plus performante que MBB et Waha (Figure 13). Waha s'est montrée plus performante que Bousselam et MBB au cours des campagnes 2000/2001 et 2003/2004. Il est intéressant de remarquer que, dans les cas les plus défavorables, Waha et Bousselam présentent un rendement grain au moins égal à celui de MBB (Figure 13).

Tableau 4. Effet moyen génotype des variables mesurées

Génotype	RDT	NGM ²	PMG	NGE	NE	HT	PREC
Waha	294.5	8077.7	37.3	19.6	407.4	61.6	119
Bousselam	314.4	8518.2	37.5	20.9	411.3	71.2	124.4
MBB	252.5	6823.3	37.7	16.9	400.5	80.5	128.5
M. G.	287.1	7806.4	37.5	19.1	406.4	71.1	23.9
Ppds5%	66.3	1929.8	2	3.3	50.5	6.8	2.1

NGM² = nombre de grains m⁻², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m⁻², PREC= durée de la phase végétative (du 1 janvier à l'épiaison, en jours)

Au cours de six campagnes sur sept, les variétés Waha et Bousselam se sont montrées plus performantes que MBB. Le gain génétique moyen de ces variétés est de 42.0 g.m⁻² pour Waha et 62.0 g.m⁻² pour Bousselam. Bousselam réalise donc une augmentation moyenne de rendement de 20 g.m⁻² relativement à Waha. Exprimé en pourcentage du rendement de MBB, les gains réalisés au cours des sept campagnes d'étude varient de -0.6 à 35.2% pour Waha avec une moyenne de 16.6% et de -6.4 à 116.3% pour Bousselam, avec une moyenne de 24.5% (Figure 14).

Du point de réactivité vis-à-vis de la fertilité du milieu, représentée par la moyenne des rendements des trois cultivars, Bousselam est similaire à MBB, avec cependant une grande différence pour le potentiel de rendement (Figure 15). Waha, par contre, se montre plus sensible vis-à-vis des conditions climatiques défavorables où il adopte un comportement similaire à celui de MBB, mais réagit rapidement et valorise le milieu lorsque les conditions deviennent favorables, pour égaler Bousselam (Figure 15).

Les performances de rendement des trois génotypes sont liés au nombre de grains m⁻², ($r_{RDT_NGM^2}=0.975^{**}$), au nombre d'épis ($r_{RDT_NE}=0.570^{*}$) et au nombre de grains par épi ($r_{RDT_NGE}= 0.846^{**}$). La réalisation d'un nombre de grains m⁻² donné semble dépendante des épis ($r_{NGM^2_NE}= 0.561^{*}$) et surtout du nombre du nombre de grains par épi ($r_{NGM^2_NGE}=0.885^{**}$). Elle est aussi affectée négativement par le poids de 1000 grains

($r_{NGM^2_PMG} = -0.550^*$). Le nombre de grains par épi est lié négativement au poids de 1000 grains ($r_{NGE_PMG} = -0.527^*$).

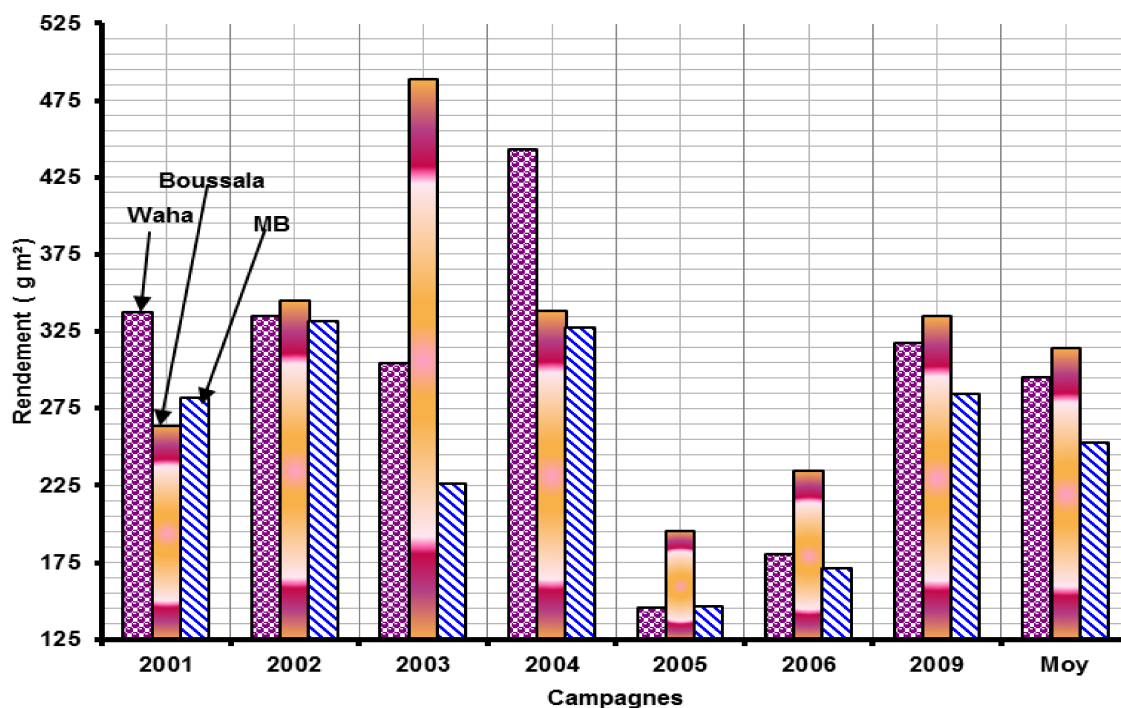


Figure 13. Performances de rendement grain des trois génotypes par campagne.

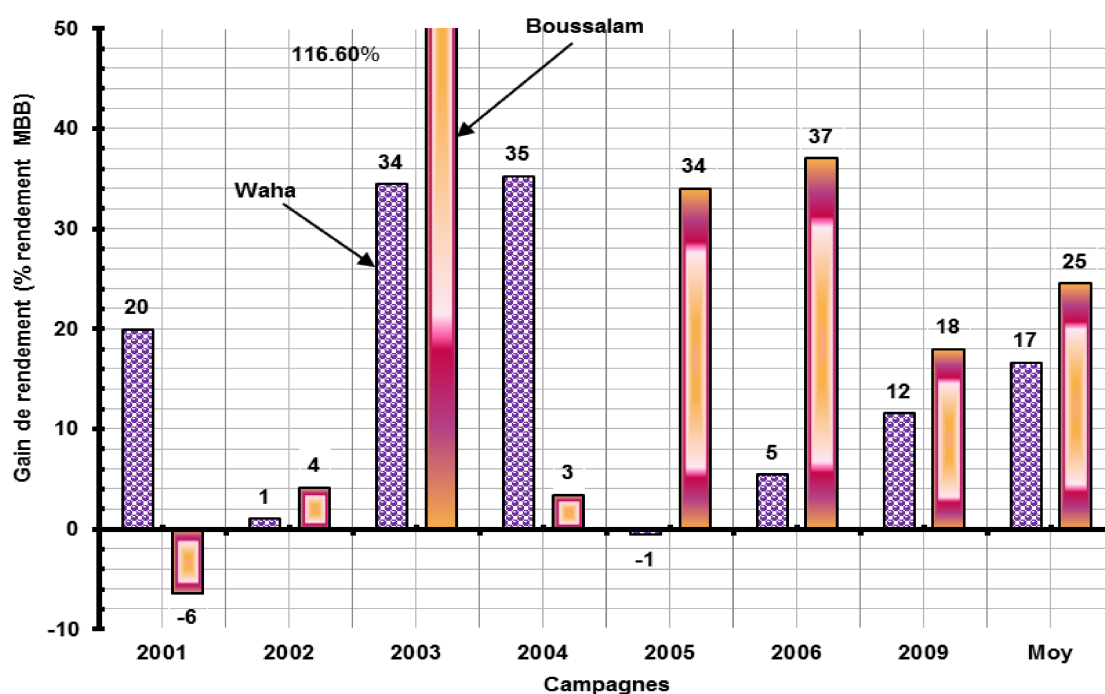


Figure 14. Ecart de rendement grain de Waha et Boussalam en % du rendement de MBB.

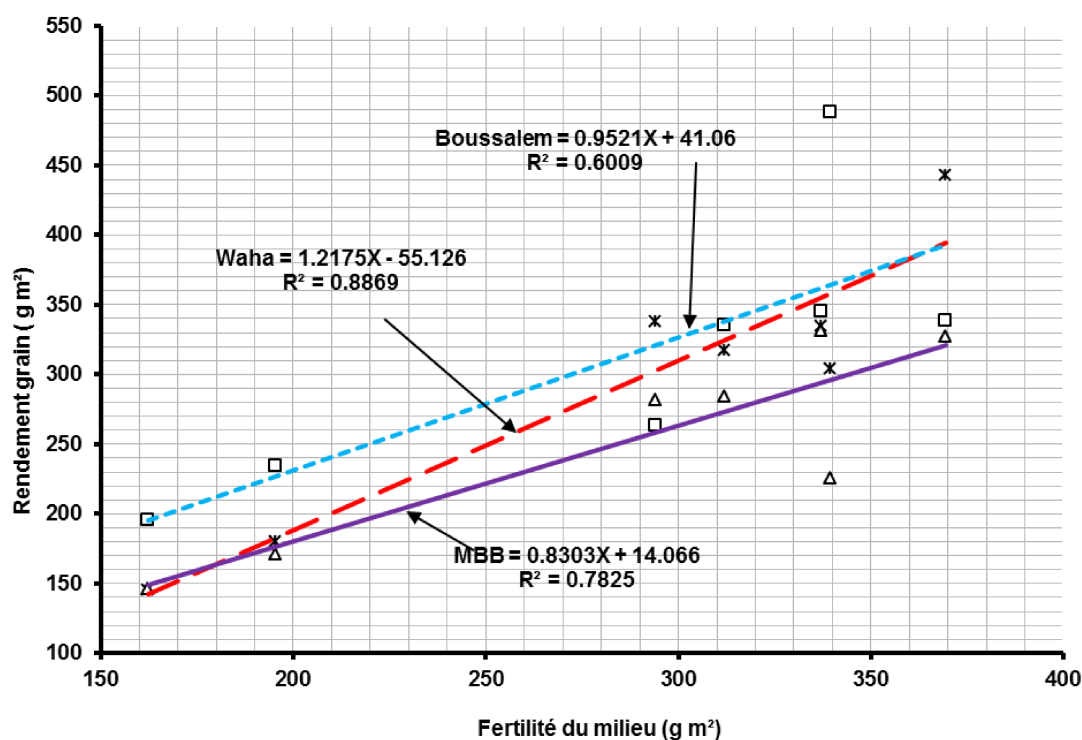


Figure 15. Réactivité des trois variétés pour la performance de rendement grain selon la fertilité du milieu.

Sous les conditions de production de la présente étude, le poids de 1000 grains (PMG) se réalise en pleine période de stress intense. De ce fait un poids de 1000 grains élevé est le résultat des effets de compensation qui s'instaurent entre le nombre de grains par épi et le poids individuel du grain. Duggan et Fowler (2006) mentionnent que la compétition entre le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains explique une grande part de l'interaction et permet à certaines variétés d'ajuster leur rendement sous stress. Ces résultats corroborent ceux De Vita *et al.*, (2007) qui mentionnent que le gain génétique obtenu sur blé dur, en Italie, est associé à un grand nombre de grains produit par m², à un nombre élevé d'épis et à une réduction de la hauteur du chaume.

Par ailleurs, dans un milieu donné, même en l'absence de facteur limitant, le nombre de grains produit varie fortement entre variétés (Demotes-Mainard *et al.*, 1999; Cossani *et al.*, 2007, 2009). Ceci est dû à plusieurs origines : des différences de

fertilité d'épi entre génotypes, des différences génotypiques de nombre d'épis formés par unité de surface, des différences de nombre d'épillets et de nombre de fleurs formées (Gate, 1995).

Augmenter le nombre de grains par épi chez le blé est un moyen efficace pour améliorer les rendements potentiels (Pfeiffer *et al.*, 2000; Zhuang, 2003; Royo *et al.*, 2007; He *et al.*, 2011). Ainsi, chez les nouvelles sélections de blé dur, l'augmentation du nombre de grains par épi apporte un gain génétique du nombre de grains par unité de surface de 50% (Royo *et al.*, 2007). L'amélioration de la fertilité seule ou combinée avec le nombre d'épis/m² sont aussi rapportés comme étant une cause de l'augmentation du rendement grain des nouvelles variétés (Donmez *et al.*, 2001 ; Shearman *et al.*, 2005).

D'après Cox *et al.*, (1988), le gain génétique du rendement grain est associé à l'augmentation du nombre de grains par m² et celui du poids de mille grains. Par contre, Perry et D'Antuono (1989) mentionnent l'augmentation du nombre de grains/m² et la réduction du poids de 1000 grains. Comparativement à MBB, Bouzerzour et Benmahammed (2009) rapportent que l'amélioration du rendement grain chez Waha est liée à une réduction du poids de 1000 grains et une augmentation du nombre de grains/m².

L'amélioration du rendement grain chez les nouvelles obtentions vient d'une amélioration de l'indice de récolte (Reynolds *et al.*, 1999). La biomasse aérienne a aussi connu une légère augmentation, avec une nette amélioration de l'indice de récolte (Austin *et al.*, 1980). Les nouvelles obtentions semblent posséder la capacité de faire une meilleure utilisation de l'azote du sol et des fertilisants pour produire plus de grains, avec une nette efficacité d'utilisation de l'azote en post-anthèse (Cox *et al.*, 1988 ; Ortiz-Monasterio *et al.*, 1997).

L'introduction des gènes de nanisme, et la sélection des variétés courtes ont réduit la compétition entre la croissance de l'épi et celle de la tige pendant la pré-anthèse, et par conséquent, elles améliorent le transfert des assimilats vers l'épi (Fischer et Stockman, 1986). Brancourt-Humel *et al.*, (2003) mentionnent que le rendement grain a connu un changement significatif entre 1956 et 1999, de l'ordre de 126 kg/ha/an.

Plusieurs auteurs ont comparé le rendement potentiel des variétés anciennes et modernes (Feil 1992 ; Slafer et Andrade 1990). L'objectif est de déterminer le gain génétique du rendement grain, évalué sur la base des données collectées au cours de longues périodes et/ou sur la base des essais comparatifs de rendement intégrant les variétés anciennes, prises comme témoins, et les nouvelles obtentions représentant l'apport génétique dû à la sélection.

Cette dernière approche est plus intéressante, elle évalue les mêmes génotypes sous les mêmes conditions culturales et climatiques. Elle permet ainsi de mesurer les changements qui ont touché les caractères liés et l'architecture de la plante, suite aux effets du processus de sélection. Selon Richards *et al.*, (1997), Araus *et al.*, (1998) et Benmahammed *et al.*, (2004) le frein à la réalisation d'un progrès de rendement significatif, sous stress, résulte de la variation du degré d'expression de la multitude de caractères qui conditionnent le rendement dans de tels milieux.

Du point de vue production, quelles alternatives possède l'agriculteur pour favoriser l'expression d'une bonne fertilité des épis chez Bousselam et Waha ? Le choix des dates de semis, le désherbage précoce et la fertilisation azotée contribuent positivement à l'amélioration de la fertilité des épis et par conséquent augmentent le nombre de grains par m² et le rendement grain de ces variétés (Karam *et al.*, 2009).

Donaldson *et al.*, (2001) rapportent que les semis précoces engendrent des

augmentations significatives des nombres d'épis par m² et de grains par épi, suite à une meilleure utilisation des eaux pluviales. Zamani et Nasser (2008) considèrent que les semis précoces augmentent le rendement grain du blé.

2.1.2. La hauteur de la plante et la précocité d'épiaison

L'analyse de la variance montre une interaction génotype x campagnes hautement significative et un effet génotype significatif, pour la hauteur et la durée de la phase végétative (Tableau 2). L'effet moyen génotype indique que Waha est la plus courte de paille, Bousselam a une taille intermédiaire mais significativement plus haute que celle du cultivar Waha et significativement plus courte que celle de MBB qui est la variété la plus haute des trois (Figure 16).

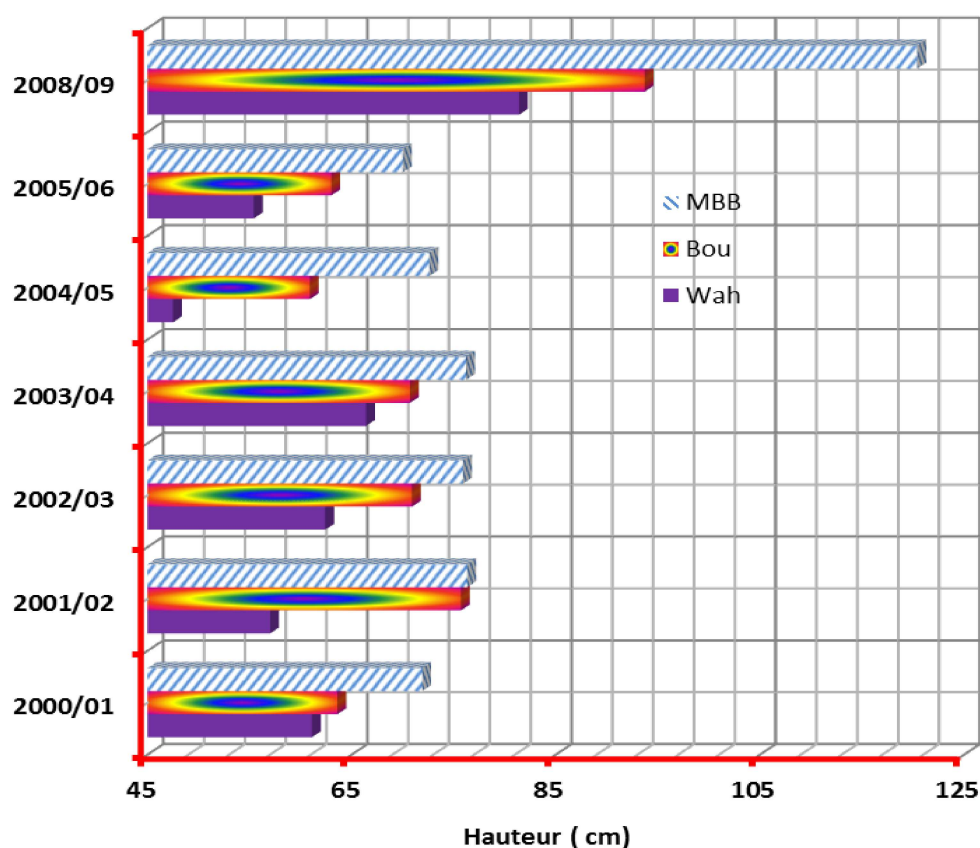


Figure 16. Variation de la hauteur de la plante des trois variétés selon les campagnes.

L'effet moyen génotype de la durée de la phase végétative indique aussi que Waha est la plus précoce. Bousselam présente une précocité intermédiaire entre celles de Waha et de MBB. MBB est la variété la plus tardive (Figure 17). Tewolde *et al.*, (2007) mentionnent que les cultivars à épiaison précoce sont plus productifs que les cultivars qui se caractérisent par une épiaison tardive. Cette caractéristique est le plus souvent associée à l'évitement des stress et contribuant à la régularité de la production (Pfeiffer, 1993). Les résultats, de l'effet moyen génotype, suggèrent que le choix entre les trois génotypes est plus aisé pour la hauteur du chaume et la durée de la phase végétative, mais il est plus complexe pour les autres caractères suite à la présence d'une interaction significative (Tableau 2)

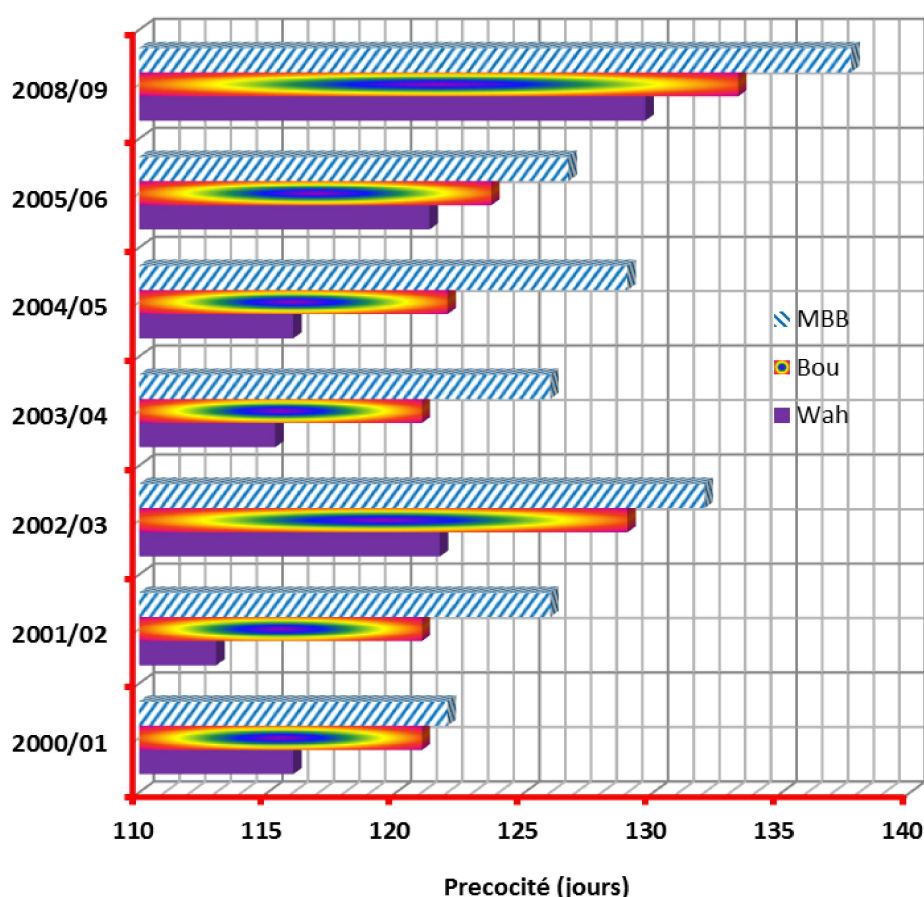


Figure 17. Variation de la durée de la phase végétative des trois variétés selon les campagnes.

2.2. Les déterminants du rendement grain chez les trois génotypes

Alors que les résultats de l'analyse des corrélations suggèrent que le rendement grain est significativement corrélé avec le nombre de grains par m² et par épi, avec peu d'effet du poids de 1000 grains, l'analyse de la régression progressive indique au contraire que le rendement grain des trois cultivars est déterminé par l'effet concomitant du nombre de grains par m² et du poids de 1000 grains, qui expliquent 99.0% de la variation des sept campagnes (Tableau 5). Ceci est un des avantages de la régression progressive qui élimine les variables hautement corrélées entre elles (cas des nombres de grains par épi et par m²), ne gardant qu'une seule dans le modèle.

Tableau 5. Analyse de la régression progressive du rendement sur les composantes chez les 3 génotypes.

	Source	ddl	CME	F	R ²	Constante
MBB	Régression	2	16032.0	242.9**	0.992	
	Résiduelle	4	66.0			
	Variables (X)	b	Et _b	t	Prob	
	NGM ²	0.039	0.002	20.90	0.000	
	PMG	6.495	0.953	6.80	0.002	-259.18
Waha	Régression	2	30526.12	433.24**	0.995	
	Résiduelle	4	70.46			
	Variables (X)	b	Et _b	t	Prob	
	NGM ²	0.037	0.001	25.80	0.000	
	PMG	5.324	1.097	4.86	0.008	-201.50
Bousselam	Régression	2	27596.20	653.64**	0.997	
	Résiduelle	4	42.26			
	Variables (X)	b	Et _b	t	Prob	
	NGM ²	0.036	0.001	34.24	0.000	
	PMG	6.927	0.937	7.39	0.002	-251.08

Les valeurs des coefficients de régression indiquent que l'augmentation du nombre de grains par m² de 1000 grains améliore le rendement grain de 36, 37 et 39 gm²,

alors que l'augmentation du poids de 1000 grains de 1 g augmente le rendement grain de 6.9, 5.3 et 6.5 g m⁻², respectivement chez Bousselam, Waha et MBB (Tableau 5).

Il est plus facile d'augmenter le nombre de grains par m², par les techniques culturales, que le poids de 1000 grains qui se forme sous conditions de stress hydrique et thermique intenses. Chez MBB, le nombre de grains par m² a varié de 3719.1 à 9588.1 et le poids de 1000 grains de 31.7 à 44.4 g.

Chez Waha, ces deux caractères ont varié de 3976.1 à 12146.5, et de 34.4 à 45.4 g, respectivement. Alors que chez Bousselam, la variation des deux variables est de 5461.9 à 13944.5, et de 34.8 à 42.9 g, au cours des sept campagnes d'étude.

2.3. Effets de la variation climatique sur les déterminants du rendement grain

Les valeurs des paramètres climatiques utilisés pour expliquer la variation du rendement et des composantes du rendement des trois génotypes étudiés sont indiquées au tableau 6. Le cumul de la pluie est calculé du semis (15 novembre) à la fin du mois de juin, ainsi que le nombre de jours dont la température est supérieure à 25°C, le nombre de jours dont la température est inférieure à 0°C et le nombre de jours avec une pluie supérieure à 10 mm.

Une importante variation existe pour ces paramètres climatiques. Ainsi le cumul pluviométrique varie de 155 à 512.7 mm, celui du nombre de jours dont la température est supérieure à 25°C, de 24 à 54 jours. Le nombre de jours dont la température minimale est inférieure à 0°C, varie de 10 à 77 jours.

Le nombre de jours dont la pluie est supérieure à 10 mm varie de 4 à 18 jours. La température moyenne mensuelle varie de 5.7 en janvier à 24.9°C en juin et la pluie accumulée par mois de 60.8 mm en janvier à 17.3 au mois de juin (Tableau 6).

Tableau 6. Valeurs des paramètres climatiques utilisés pour expliquer la variation du rendement grain et des composantes du rendement grain des trois génotypes étudiés.

Camp	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2009	Moy
Pluie	217	155	512.7	332.4	312.7	280.3	314.4	317.8
N°J _{T>25}	41	41	52	24	54	52	48	44.6
N°J _{T<0}	10	26	41	59	77	62	56	47.3
N°J _{P>10}	4	5	18	10	7	8	9	8.7
T _{Janvier}	6.6	6.9	5.2	5.8	4.8	3.7	6.9	5.7
T _{Février}	7	8.8	4.8	8.6	5.9	3.2	6.5	6.4
T _{Mars}	17.1	12.1	9.8	10.4	11.2	10.3	10.3	11.6
T _{Avril}	16	15.4	12.6	10.9	17	12.6	12.7	13.9
T _{Mai}	18.8	20.2	16.9	10.4	21.9	20	22.6	18.7
T _{Juin}	25.9	26.4	24.1	21.4	26.1	23.7	26.5	24.9
P _{Janvier}	79	22.7	116	42.5	28	67.8	69.3	60.8
P _{Février}	20.4	24	38.8	18.4	39.8	37.4	41.3	31.4
P _{Mars}	8.6	29.3	36.6	34.1	18	9.8	27.3	23.4
P _{Avril}	13.2	8.8	38.4	68.8	44.3	42.4	77.3	41.9
P _{Mai}	19.3	24.2	43.8	73.6	2.2	88	3.4	36.4
P _{Juin}	0	1.5	59.4	16.7	35.9	7.4	0	17.3

Ainsi chez MBB, c'est surtout la température hivernale (moyenne de janvier et de février) qui explique, le plus, la réduction du rendement de cette variété par rapport au potentiel permis par le milieu (Figure 18). Le signe positif du coefficient de régression suggère qu'un hiver relativement plus doux, au cours de la période concernée par l'étude, a été plus favorable à l'expression d'un rendement grain élevé chez ce cultivar (Tableau 7, Figure 18).

Les basses températures des mois de janvier et février coïncident avec la période début tallage chez MBB, ce qui affecte considérablement le nombre des épis par unité de surface, Annichiarico *et al.*, (2005) mentionnent les effets de cette contrainte sur la croissance, le développement et l'expression du potentiel de rendement chez les génotypes de blé dur évalués sur les hauts plateaux algériens.

Tableau 7. Analyse de la régression progressive du rendement des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.

MBB			Bousselam			Waha		
Source	ddl	CME	Source	ddl	CME	Source	ddl	CME
Rég.	1	31256**	Rég	2	25372**	Rég	1	45097*
Rés	5	1765	Rés	4	1153	Rés	5	3247
x	b	t	X	b	t		b	t
T _{J+F} °C	42.0	10.7*	P _{mars}	6.5	5.36**	T _{>25°C}	-8.3	3.73*
			P _{janvier}	1.5	3.52*			
cte	-490.5		Cte	-419.2		Cte	174.4	
R ²	0.759		R ²	0.917		R ²	0.735	

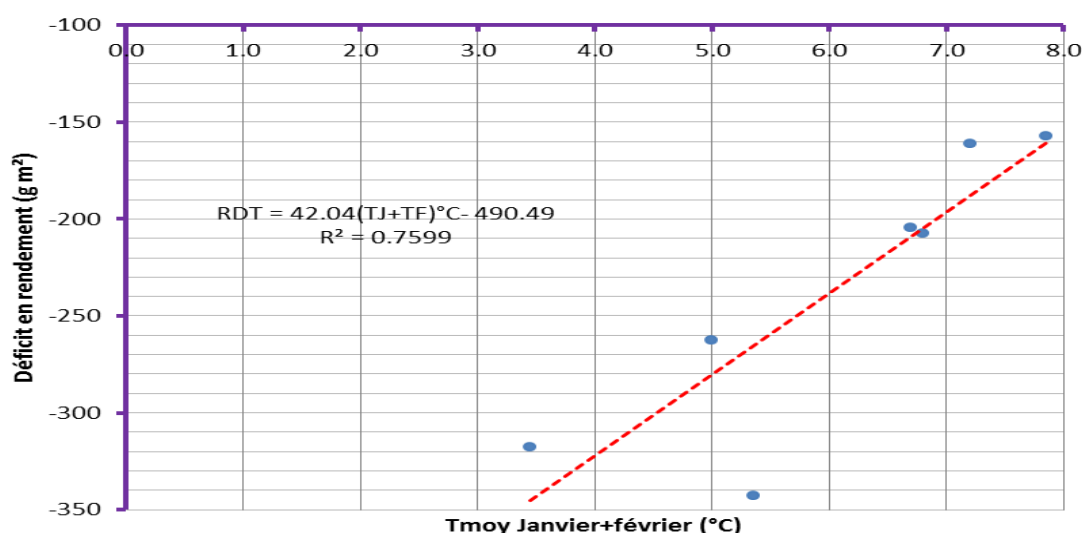


Figure 18. Variation de la baisse de rendement grain de MBB en fonction de la température moyenne hivernale des sept campagnes d'étude.

Par contre, l'écart de rendement grain, par rapport au potentiel, s'explique plus par la variation de la pluviométrie des mois de janvier et mars chez le cultivar Bousselam (Tableau 7). Les valeurs prises par les coefficients de régression suggèrent que l'effet de la pluviométrie accumulée au cours du mois de mars est plus prépondérant relativement à celui de janvier. En effet la relation entre l'écart du rendement grain du potentiel et la pluviométrie du mois de mars est de type

quadratique, dans la marge allant de 7 à 35 mm de pluie par mois, observée au cours des sept campagnes de l'étude (Figure 19).

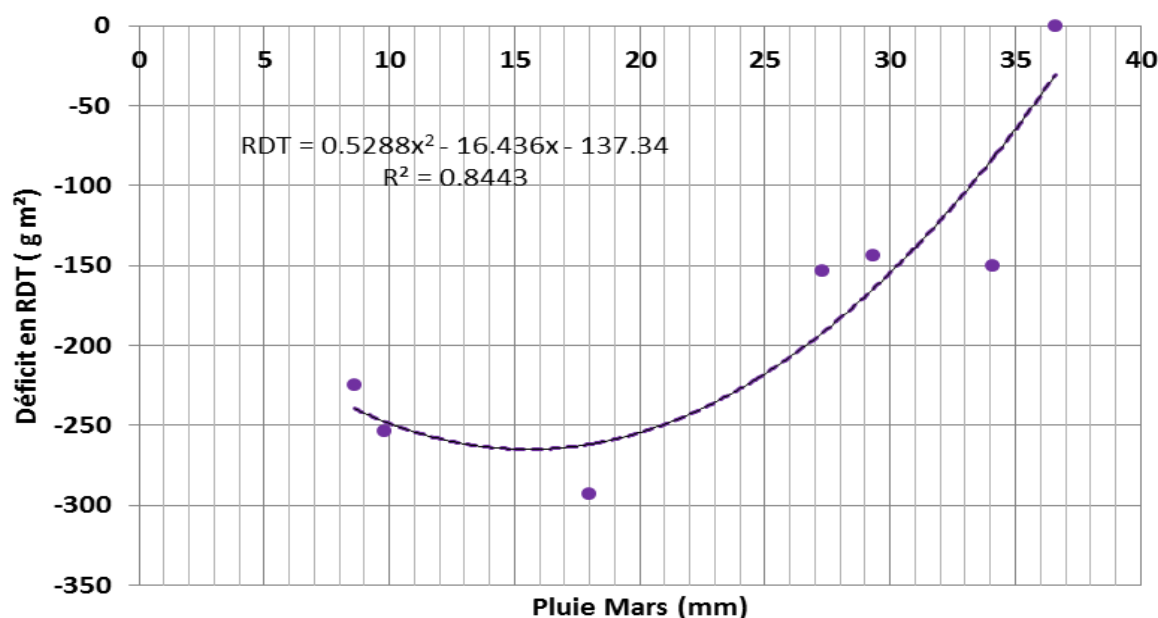


Figure 19. Variation de la baisse de rendement grain chez Bousselam en fonction de la variation de pluviométrie du mois de mars des sept campagnes d'étude.

L'effet bénéfique de la pluie de mars est renforcé par celui du mois de janvier, dont les coefficients respectifs sont de 6.5 et 1.5 g m⁻² d'augmentation du rendement grain pour chaque millimètre de pluie enregistré en plus (Tableau 7). Chennafi *et al.*, (2008c) notent que la baisse de rendement final de la culture de céréale est liée au stade d'avènement et au degré du stress hydrique survenant au cours d'une phase donnée de la culture du blé.

Le déficit en eau, lors de la période de croissance (du stade double rides à l'anthèse) et autour de l'anthèse entraîne des pertes de rendement dues à des réductions du nombre potentiel de grains par unité de surface (Fischer, 1985; Savin et Slafer, 1991; Giunta *et al.*, 1993; Cossani *et al.*, 2009), tandis que le stress hydrique et les hautes

températures au cours de la période de remplissage des grains, tel qu'il se présente souvent dans conditions méditerranéennes, réduit le poids moyen des grains (Oweis *et al.*, 2000; Acevedo *et al.*, 2002). La variation du rendement grain de Waha est, par contre, liée au nombre de jours dont la température maximale est égale ou supérieure à 25°C. Un jour de plus dont la température maximale est égale ou supérieure à 25°C réduit le rendement de 8.3 g m⁻² (Figure 20).

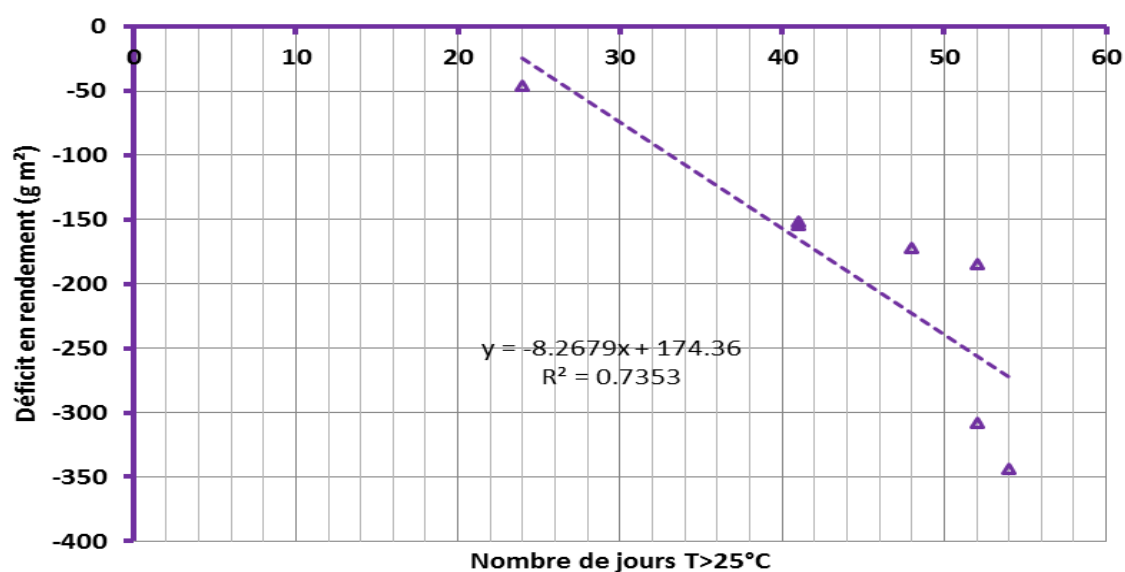


Figure 20. Variation de la baisse de rendement grain chez Waha en fonction du nombre de jours dont la température maximale est égale ou supérieure à 25°C au cours des sept campagnes d'étude.

Wardlaw et Willimbrik (1994) signalent que la température optimale pour le développement et le remplissage du grain des céréales d'hiver varie de 12 à 15°C et qu'une diminution de 3 à 5% du poids du grain pour chaque degré centigrade d'augmentation de la température à partir de la base des 15°C, est notée.

Le stress thermique limite considérablement la croissance des plantes et leurs rendements (Georgieva, 1999; Hassan, 2006), notamment quand il coïncide avec la

phase reproductive, ce qui conduit à une perte importante de rendement chez le blé (Hays *et al.*, 2007). Une période de trois à cinq jours de stress thermique durant la phase de remplissage du grain chez le blé entraîne des réductions importantes en rendement grain (Semenov et Halford, 2009).

Ces résultats montrent des comportements très contrastées des trois cultivars étudiés. Ainsi le rendement grain de MBB est plus sensible à la température hivernale, celui de Bousselam l'est à la pluie du mois de mars, alors que celui de Waha se montre sensible à la température maximale égale ou supérieure à 25°C.

Ces résultats indiquent que la baisse du rendement, observée chez les différents génotypes étudiés, est induite par différents paramètres climatiques. Le rendement grain est la résultante du nombre de grains produit par unité de surface et du poids de 1000 grains. Tout écart de rendement grain observé suite à l'effet du milieu est induit par la variation que subit le nombre de grains par m² (Figure 21).

2.3.1. Le nombre de grains par m²

L'étude de la sensibilité, à la variation climatique, des caractères qui déterminent le rendement, fournirait plus d'informations sur les facteurs mis en cause. Le nombre de grains par m² en tant que composante est largement déterminé par les nombres d'épis et de grains par épi, chez les trois cultivars.

La réduction du nombre de grains produit par m² par rapport au potentiel est affectée par la température moyenne du mois de janvier et la somme des pluies de mai et juin chez MBB (Tableau 8).

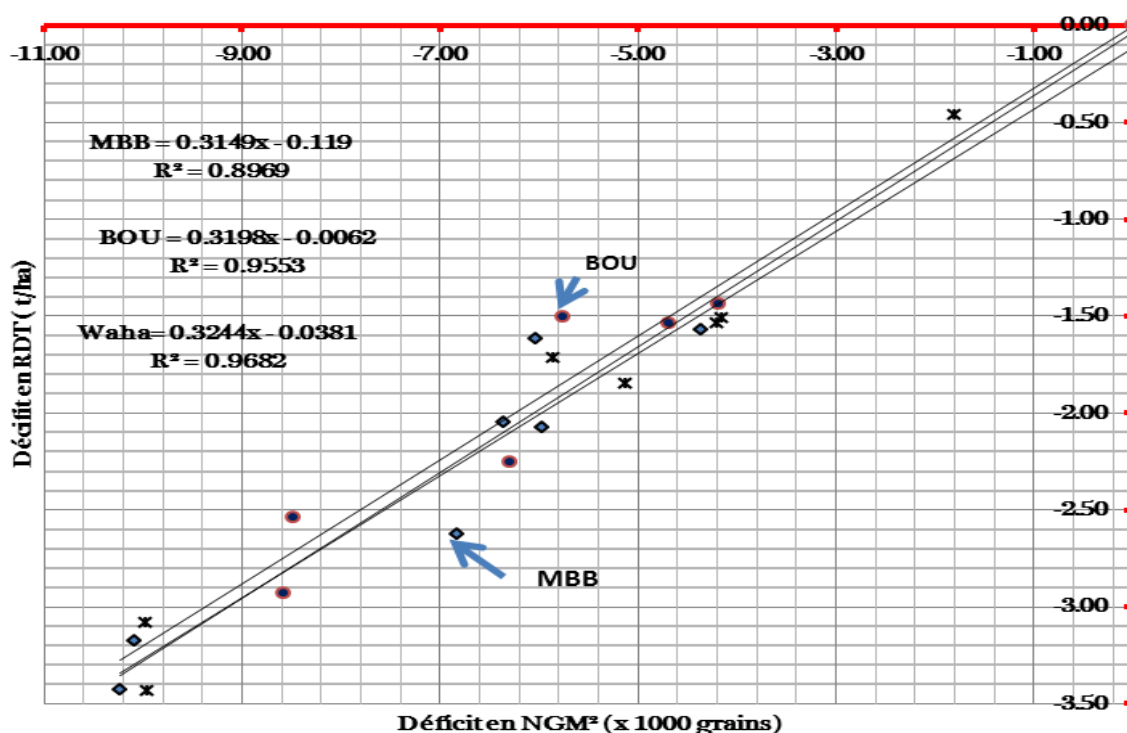


Figure 21. Variation de la baisse de rendement grain (t/ha) en fonction de la réduction du nombre de grains produit par m² observée au cours des sept campagnes d'étude, chez les trois cultivars.

Chez MBB, l'importance de la valeur du coefficient de régression indique que c'est surtout la température moyenne du mois de janvier qui est à l'origine de la variation du nombre de grains produits par m² au cours des sept campagnes de l'étude (Tableau 8, Figure 22), selon Fletcher (1983), l'effet des basses températures hivernales est plus prononcé sur les talles fertiles, ce qui affecte ultérieurement le nombre de grains par m².

Chez Bousselam, c'est les pluies de mars qui affecte ce caractère (Tableau 8, Figure 23), le déficit hydrique provoque des pertes de rendement grain dues à des réductions du nombre potentiel de grains par unité de surface pendant la période qui s'étale de la phase végétative jusqu'à l'anthèse (Fischer, 1985; Savin et Slafer, 1991;

Giunta *et al.*, 1993; Cossani *et al.*, 2009), selon Fischer (1985), la période critique pour la détermination du nombre de grains par unité de surface couvre environ vingt jours avant l'anthèse.

D'autres études ont confirmé que cette période critique s'étale de vingt jours avant à environ dix jours après l'anthèse (Savin et Slafer, 1991; Ortiz-Monasterio *et al.*, 1994; Abbate *et al.*, 1995, 1997); alors que chez Waha, c'est le nombre de jours dont la température est égale ou supérieure à 25°C qui est la cause principale de la variation du nombre de grains produit par m² (Tableau 8, Figures 24), ces hautes températures coïncident avec le stade floraison, c'est là où le nombre d'épillets fertiles est affecté, et par conséquent le nombre de grain par m² diminue.

Tableau 8. Analyse de la régression progressive du nombre de grains par m² des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.

MBB			Bousselam			Waha		
Source	ddl	CME	Source	ddl	CME	Source	ddl	CME
Rég	4	13914016**	Rég	4	29028813**	Rég	1	38475773**
Rés	2	353928	Rés	2	4534463	Rés	5	3587712
x	b	t	x	b	t	x	b	T
T _{janvier}	2418.1	8.37**	P _{mars}	193.9	2.5*	T _{>25°C}	-241.5	3.28*
P _{mai+juin}	33.6	3.9*	Cte	-9961		Cte	4897	
Cte	-22705		R ²	0.561		R ²	0.682	
R ²	0.952							

Ces résultats indiquent que la variation du nombre de grains produit par m² causée par la variation climatique, mimique fidèlement celle du rendement grain. Le nombre de grains par m² est lui-même la résultante du produit des épis produits par m² et du nombre de grains par épi. Les causes climatiques qui sont à l'origine de la

variation de ces deux composantes sont indirectement celles qui affectent le nombre de grains par m² et donc le rendement grain.

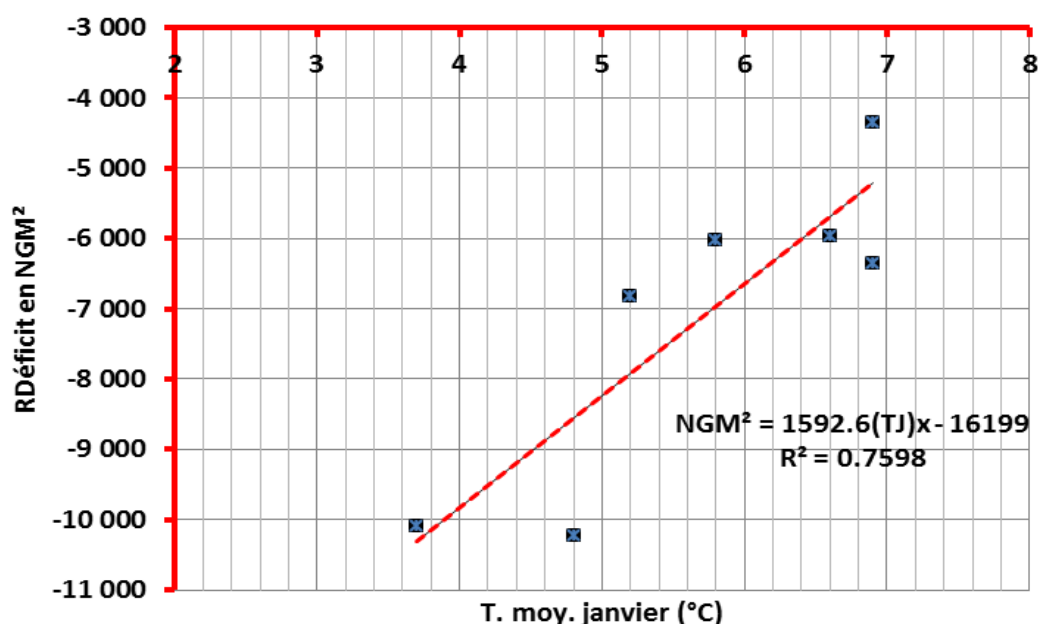


Figure 22. Variation de la baisse du nombre de grains produit par m² chez MBB en fonction de la variation de la température moyenne du mois de janvier des sept campagnes d'étude.

Le nombre de grains par unité de surface est la composante principale qui explique les variations du rendement grain sous un large éventail de conditions environnementales (Ayenech *et al.*, 2002; Fischer, 2008), cette composante s'élabore depuis la formation des ébauches d'épillets jusqu'au stade pré-anthèse, ce qui explique ses besoins en eau durant tout le cycle de développement de la culture.

L'élévation de la température au-delà des 25°C oblige la plante à utiliser une partie des substrats carbonés stockés dans le col de l'épi et la feuille étendard (Wardlaw et Moncur, 1995). La phase d'élongation de la tige, au cours de laquelle l'épi se

développe, est essentielle pour l'élaboration du nombre de grain par unité de surface (Kirby, 1988; Slafer *et al.*, 1994; Miralles et Slafer, 1999).

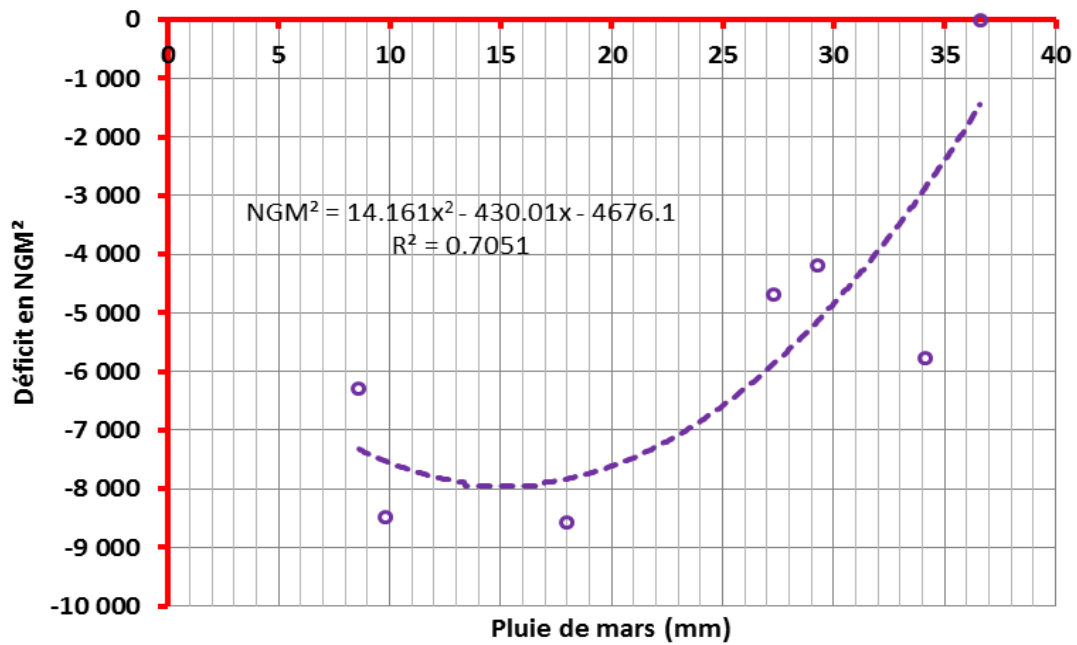


Figure 23. Variation de la baisse du nombre de grains produit par m² chez Bousselam en fonction de la variation de la pluviométrie du mois de mars des sept campagnes d'étude.

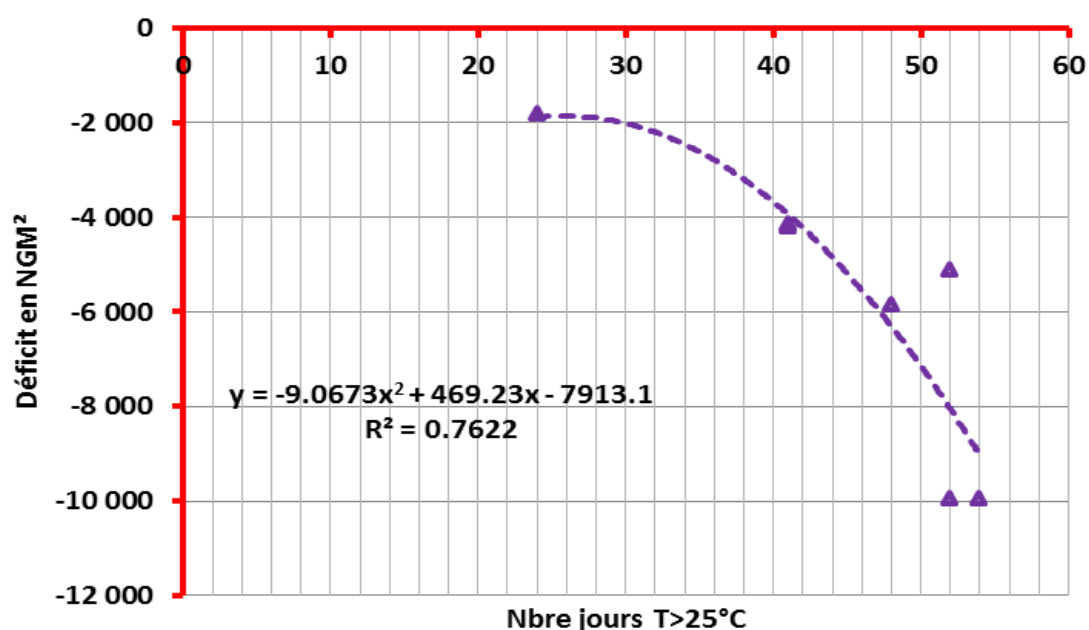


Figure 24. Variation de la baisse du nombre de grains produit par m² chez Waha en fonction de la variation du nombre de jours dont la température est égale ou supérieure 25°C au cours des sept campagnes d'étude.

En effet, il y a une forte liaison entre le poids sec de l'épi durant la floraison et le nombre d'épillets fertiles sous conditions contrastées (Miralles *et al.*, 2000; Gonzalez *et al.*, 2005c; Serrago *et al.*, 2008). Il est nécessaire de trouver des alternatives pour améliorer la croissance des épis afin d'augmenter le nombre de grain par unité de surface (Miralles et Slafer, 2007).

2.3.2. Le nombre d'épis, de grains par épi et le poids de 1000 grains

La variable nombre d'épis produits par m² est sensible au nombre de jours dont la température maximale est égale ou supérieure à 25°C (T≥25°C) chez MBB et Waha. Waha est plus sensible que MBB, au nombre de jours dont la température est égale ou supérieure à 25°C. En effet les valeurs prises par le coefficient de régression sont de -12.05 et -4.18 respectivement pour Waha et MBB.

Ces valeurs suggèrent que pour toute augmentation du nombre de jours avec $T \geq 25^{\circ}\text{C}$, le déficit en nombre d'épis par m^2 augmente de -12.05 pour Waha et de -4.18 pour MBB (Tableau 9, Figures 25 et 26). Cette même variable est, par contre, sensible à la quantité de pluie accumulée au cours du cycle de la culture chez le cultivar Bousselam où la réduction de la pluie de 1 mm induit un déficit de 331 épis m^{-2} (Tableau 9, Figure 27).

L'élévation de la température est enregistrée en fin de cycle de la culture, elle affecte les talles secondaires et tertiaires épiées qui sont plus sensibles aux stress thermiques et accélère la sénescence des feuilles. Selon Spielmeyer et Richards (2004), le nombre de talles émises durant la période végétative, qui conditionne le nombre d'épis par mètre carré, est sous l'influence conjointe de facteurs environnementaux (azote, humidité, température), des caractéristiques de la structure du couvert (densité de semis) et des facteurs génétiques, en particulier du gène TIN, localisé sur le bras court du chromosome 1A.

Tableau 9. Analyse de la régression progressive du nombre d'épis par m^2 des trois cultivars sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.

MBB			Bousselam			Waha		
Source	ddl	CME	Source	ddl	CME	Source	ddl	CME
Rég	1	11535**	Rég	1	13762*	Rég	1	14739*
Rés	5	670	Rés	5	2802	Rés	5	2233
x	b	t	X	b	t	x	b	T
$T_{>25^{\circ}\text{C}}$	-4.18	4.15**	$P_{\text{cycle}} (\text{mm})$	331	2.23*	$T_{>25^{\circ}\text{C}}$	-12.05	2.56*
C_{te}	84.25		C_{te}	-196.7		C_{te}	129.9	
R^2	0.775		R^2	0.496		R^2	0.569	

Le blé présente une bonne plasticité pour le nombre de talles émises vis-à-vis de la disponibilité en azote (Oscarson, 2000). Ce mécanisme d'adaptation consiste en une surproduction de talles. Si les ressources sont insuffisantes, les talles surnuméraires

avortent avant la floraison et leur nutriments sont remobilisés vers les autres organes (Power et Alessi, 1978; Lauer et Simmons, 1989; Del Moral et Del Moral, 1995).

On note que les températures moyennes du mois de mai réduisent le nombre de talles épiées chez Waha, ce qui suggère que cette plante extrait l'humidité restante dans le sol après la récession des pluies et la hausse des températures, ce qui réduit le tallage, la taille et le nombre des épis.

L'écart du nombre des épis par m² est déterminé par le cumul pluviométrique du cycle de la culture chez Bousselam. Cette variété, qui valorise bien les eaux pluviales, exige également une bonne répartition de la pluie au cours de son cycle, et la recharge en eau du sol au cours de l'hiver conduisent à un faible effet du stress hydrique en fin de cycle et améliorent l'utilisation de l'eau et de l'azote par la culture (Rasmussen *et al.*, 2003).

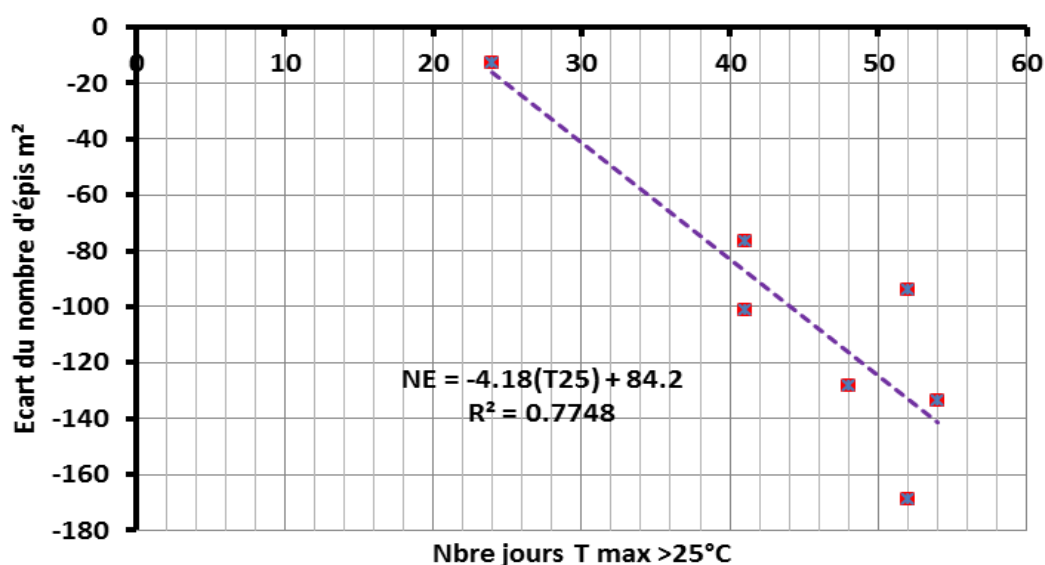


Figure 25. Réduction observée du nombre d'épis m² de MBB en fonction de la variation observée du nombre de jours dont la température est $\geq 25^{\circ}\text{C}$ au cours des sept campagnes d'étude.

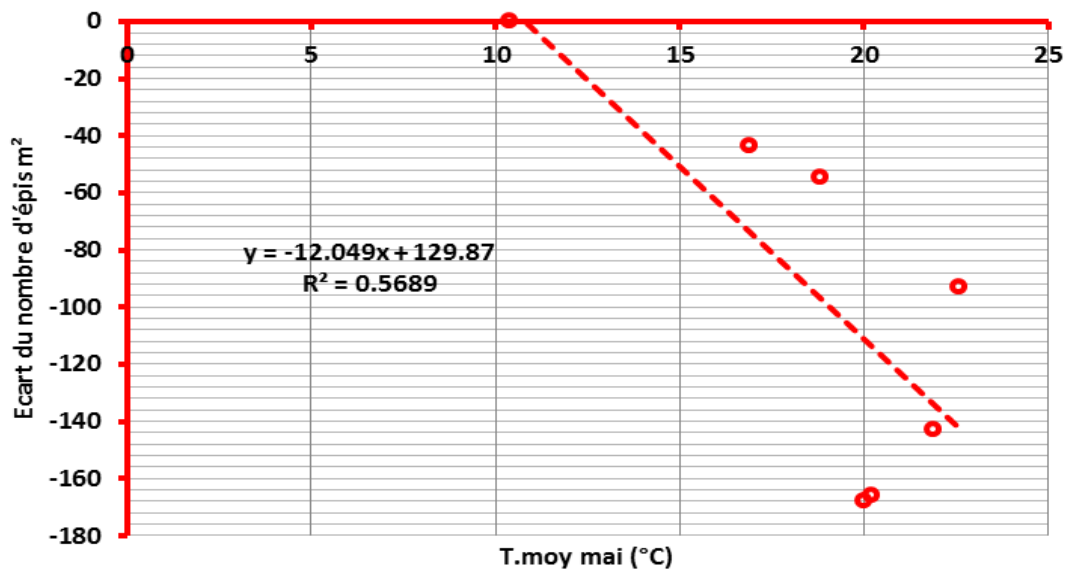


Figure 26. Réduction observée du nombre d'épis m² de Waha en fonction de la variation observée de la température moyenne du mois de mai des sept campagnes d'étude.

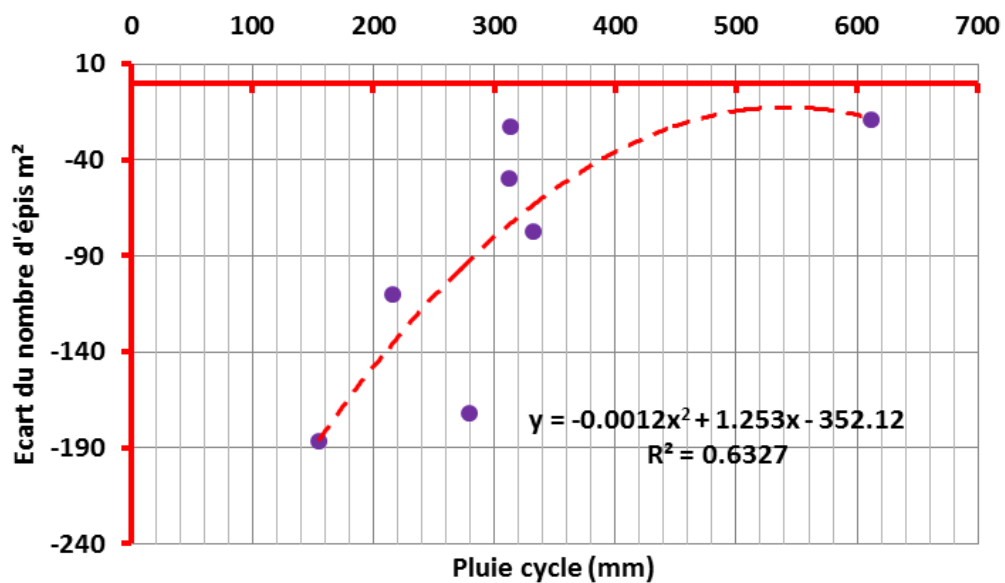


Figure 27. Réduction observée du nombre d'épis m² de Bousselam en fonction de la variation observée du cumul pluviométrique du cycle de la culture (novembre-juin) au cours des sept campagnes d'étude.

Le nombre de grains par épi est plutôt sensible à la température moyenne des mois de l'hiver, janvier pour MBB et février pour Waha. Les coefficients de régression indique une baisse de la température de 1°C, augmente l'écart ou le déficit du nombre de grains par épi de 3.48 pour MBB et de 3.61 grains par épi chez Waha (Tableau 10, Figures 28 et 29). Le nombre de grain par épi de Bousselam ne présente pas de réponse à la température hivernale.

Chez le cultivar MBB, la fertilité des épis est affectée par les basses températures du mois de janvier qui limitent considérablement la longueur de l'ébauche de l'épi et par conséquent le nombre de grains élaboré. Cette composante s'élabore depuis la mi-levée jusqu'à la floraison, elle est confrontée aux basses températures hivernales tout en affectant les talles et les épis fertiles. Le nombre de grains par épi est déterminé au cours de la dernière étape de croissance de l'épi au cours de laquelle la tige s'allonge (Fischer, 1985; Slafer *et al.*, 2001; Gonzalez *et al.*, 2005).

Tableau 10. Analyse de la régression progressive du nombre de grains par épi de Waha et MBB et du poids de 1000 grains de Bousselam sur les paramètres climatiques et valeurs des coefficients des variables explicatives.

Waha			MBB			Bousselam		
Source	ddl	CME	Source	ddl	CME	Source	ddl	CME
Rég	1	167.13*	Rég	1	106.12*	Rég	1	45.46*
Rés	5	15.5	Rés	5	6.57	Rés	5	3.89
X	b	t	X	b	t	X	b	T
T ^o _{Jan+fév}	3.61	3.28*	T ^o _{jan}	3.48	4.02*	P _{mai}	0.082	3.41*
Cte	2.67		Cte	2.67		Cte	2.67	
R ²	0.683		R ²	0.763		R ²	0.777	

La fertilité des épis varie en fonction des réponses du cultivar à la température et de la durée du jour (Takahashi et Nakaseko, 1992; Slafer et Rawson, 1994; Fukushima *et al.*, 2001). Gate (1995) précise également qu'une seule journée à une température

minimale inférieure à -4°C entre le stade épi à 1cm et un nœud pénalise le nombre de grains par épi. Les basses températures peuvent permettre aux épillets et aux fleurs les moins développés d'achever complètement leur développement si les facteurs de croissance ne sont pas limitant (Gate, 1995).

Des températures au seuil de 4°C sont rapportées comme étant néfastes pour les grains de pollen et l'ovaire (Gate *et al.*, 1990), en revanche, Mekhlouf *et al.*, (2006) notent que la phase méiose-épiaison de la variété Mohammed Ben Bachir intervient tardivement au moment où le risque de froid est minimal, pour le milieu où cette variété se montre relativement plus adaptée. La fertilité des épis chez le cultivar Waha, est confrontée aux températures moyennes hivernales, cette composante débute sa formation juste avant l'épiaison, au stade méiose, et s'achève quatre à huit jours après l'épiaison une fois que la floraison a eu lieu (Bahlouli *et al.*, 2005), des conditions défavorables au cours de cette étape l'affectent principalement. Abbassenne *et al.*, (1998) observent une chute de la fertilité des épis des semis précoces qui est liée aux effets des basses températures au cours du stade gonflement. Mouret *et al.*, (1990), signalent que le tallage, le nombre d'épis et le nombre de grains par épi sont conditionnés par l'intensité des basses températures.

Le poids de 1000 grains de Waha et celui de MBB ne présentent pas de réponse à la température hivernale ni à la pluie printanière. Par contre le poids de 1000 grains de Bousselam est significativement affecté par la pluie du mois de mai (Tableau 10, Figure 30). Pour chaque millimètre en moins au mois de mai, le poids de 1000 grains de la variété Bousselam répond par une réduction de 0.082 g, en moyenne, relativement à la valeur maximale obtenue en absence de la contrainte.

La relation est plus complexe, elle est de type quadratique (Figure 27). Ces résultats concernant la réponse des épis, du nombre de grains par épi et du poids de

1000 grains aux paramètres climatiques suggèrent que MBB et Waha sont sensibles à la variation de la température (hivernale et printanière) alors que Bousselam est plus sensible au déficit hydrique, tout le long de son cycle.

Dans les conditions méditerranéennes, la taille des graines est reconnue comme une composante de rendement particulièrement vulnérable en raison des contraintes fréquentes à laquelle la croissance de cette dernière est exposée (Meynard et David, 1992). Royo *et al.*, (2000) notent que le stress hydrique de la floraison à la maturité, accélère la sénescence des feuilles et réduit la durée et le taux de remplissage des grains.

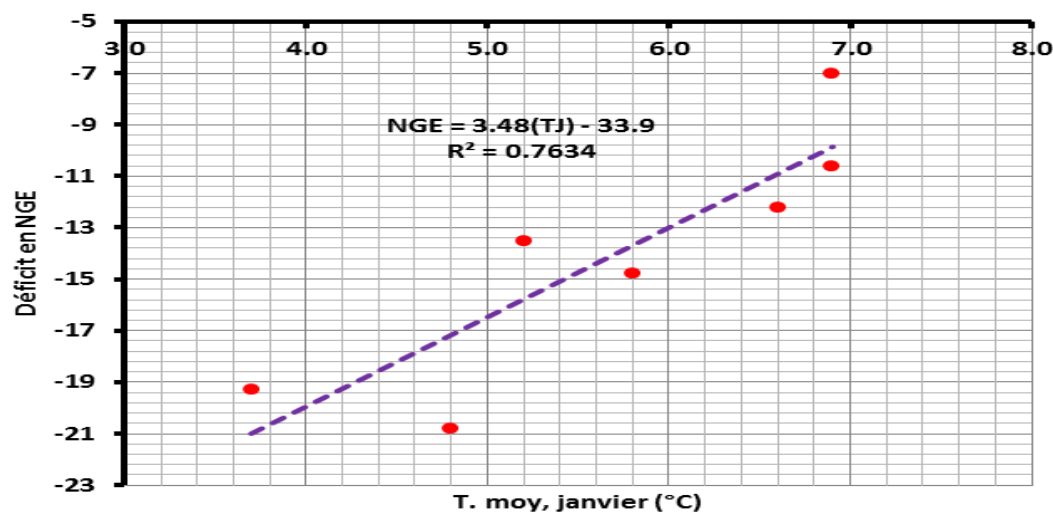


Figure 28. Réduction observée du nombre de grains par épi chez MBB en fonction de la variation observée de la température moyenne du mois de janvier des sept campagnes d'étude.

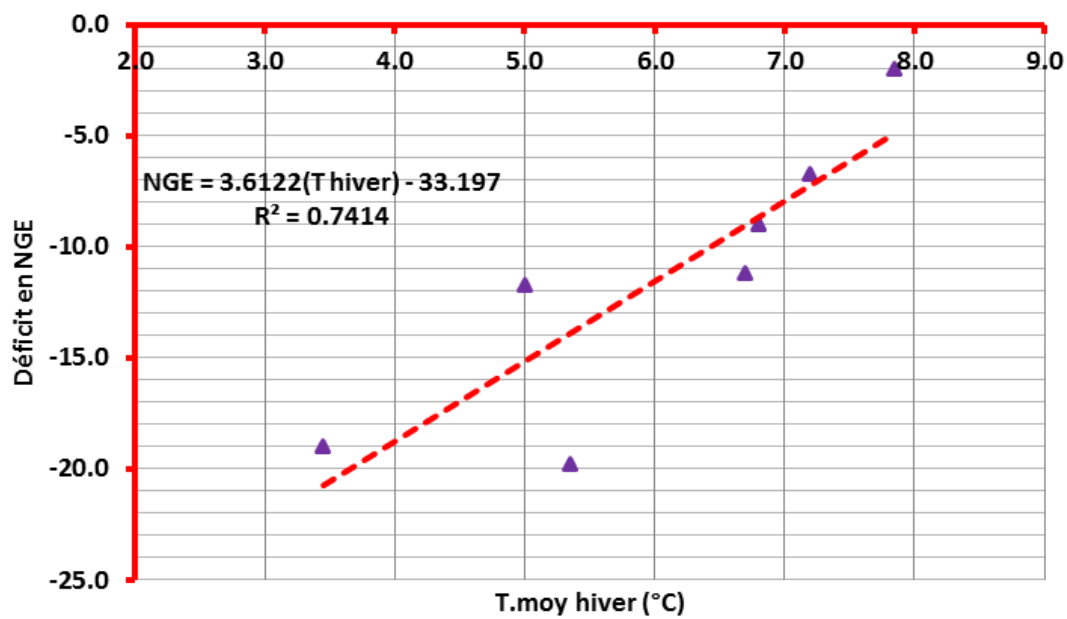


Figure 29. Réduction observée du nombre de grains par épi chez Waha en fonction de la variation observée de la température moyenne hivernale (moyenne de janvier et février) des sept campagnes d'étude.

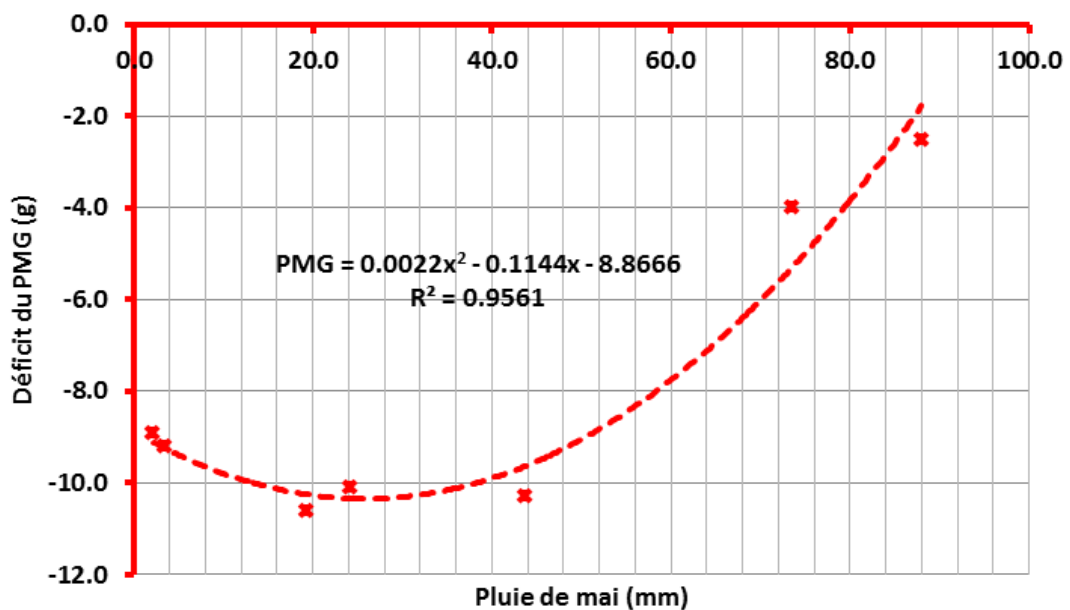


Figure 30. Réduction observée du poids de 1000 grains de Bousselam en fonction de la variation observée de la pluviométrie du mois de mai des sept campagnes d'étude.

Le stress hydrique réduit le poids moyen du grain (Acevedo *et al.*, 2002). Selon Calderini *et al.*, (2001), le poids moyen du grain est une source importante de la variation des rendements grains, particulièrement dans les régions à vocation céréalières, du bassin méditerranéen caractérisées par les stress de fin de cycle fréquents.

Le rendement grain chez les céréales peut être analysé en termes du nombre de grains par épi, d'épis par m² et du poids moyen d'un grain. Ces composantes se développent de manière séquentielle. Les premières composantes à se former affectent significativement les suivantes, sous conditions de contraintes hydriques et/ou thermiques (Hamid et Grafius, 1978; Garcia del Moral *et al.*, 1991; Simane *et al.*, 1993).

En région semi-aride, le potentiel de ces caractères est limité par des contraintes climatiques de nature intermittente et imprévisible, telles que les basses températures, les températures élevées et le déficit hydrique. Ces contraintes se manifestent à un stade végétatif ou à un autre, tout le long du cycle de la culture. Elles sont généralement génératrices d'interaction génotype x environnements. L'étude de la réponse des variétés, les plus cultivées, permet de déterminer les contraintes auxquelles ces variétés se montrent sensibles pour leur trouver des mécanismes de tolérance ou d'esquive et ainsi réduire de leur contribution à l'interaction.

Dans ce contexte, Wang *et al.*, (2011) mentionnent qu'une croissance optimale de la culture du blé, se fait sous des conditions de température variant entre 18 et 24°C. Des températures au-dessus de 25°C, sur de courtes périodes de 2 à 6 jours, lors des stades végétatifs épiaison début remplissage du grain, réduisent significativement le rendement grain (Stone et Nicolas, 1994). La hauteur de la végétation, les composantes du rendement ainsi que la durée de cycle sont fortement réduites sous l'action des

températures élevées (Sial *et al.*, 2005 ; You *et al.*, 2009 ; Talukder *et al.*, 2010 ; Modarresi *et al.*, 2010, Mohammadi et Karimizadeh, 2012).

La réduction du rendement grain est liée à une baisse du nombre de grains par épi et à une diminution du poids individuel du grain (Wardlaw et Moncur, 1995 ; Gibson et Paulsen, 1999). Selon Lobell *et al.*, (2005), sous stress thermique et hydrique, la baisse du rendement grain est liée à celle du nombre de grains par m² qui se détermine 30 jours avant l'anthesis et se termine 4 à 7 jours après, et au poids du grain qui se détermine au cours de la phase de remplissage du grain. Les températures élevées affectent le remplissage du grain parce que l'appareil photosynthétique est endommagé suite à l'accélération de la senescence du feuillage (Radmehr, 1997; Lobell *et al.*, 2012).

Van Herwaarden *et al.*, (1998) ainsi que Yang et Zhang (2006) mentionnent que les génotypes qui présentent une grande capacité de stockage et de translocation des assimilats vers le grain, tolèrent plus les stress hydrique et thermique. Les résultats de la présente étude suggèrent que MBB est sensible aux basses températures hivernales, Waha l'est beaucoup plus aux températures supérieures à 25°C, alors que Bousselam est sensible au déficit hydrique (Tableau 11).

Tableau 11. Facteurs climatiques affectant le rendement et les composantes des différentes variétés testées.

Paramètres	RDT	NGM ²	NE	NGE	PMG
MBB	T ^o _{janv}	T ^o _{janv}	T ^o ≥25°C	T ^o _{janv}	Pas de réponse
Waha	T ^o ≥25°C	T ^o ≥25°C	T ^o ≥25°C	T ^o _{fev}	Pas de réponse
Bousselam	P _{mars}	P _{mars}	P _{cycle}	Pas de réponse	P _{mai}

Lorsque l'interaction génotype x lieux est présente, les chercheurs sont intéressés d'en connaître les causes pour les besoins de la sélection (Sayre *et al.*, 1995). En effet la compréhension de la réponse des génotypes aux facteurs du milieu aide à mieux interpréter et exploiter l'interaction (Sayre *et al.*, 1995). Les plantes réagissent à une diversité de facteurs du milieu, dont les éléments minéraux, les éléments toxiques, les sels dans la solution du sol, à la luminosité, aux excès et manques d'eau, aux basses ainsi qu'aux températures élevées (Crispeels, 1994).

L'adaptabilité est une estimation quantitative des conditions du milieu auxquelles un génotype peut s'accommoder, elle est conditionnée par la plasticité des caractères qui subissent les conditions contraignantes (Smith, 1990). Les plantes ont incorporé une variété de signaux environnementaux dans leurs processus de développement pour avoir de larges capacités d'adaptation (Scandalios, 1990).

La diversité des processus pour communiquer à l'intérieur de la cellule et entre les cellules suggère l'existence d'un grand nombre de voies par lesquelles la plante perçoit et traduit les changements des facteurs du milieu (Leigh, 1993). Il est maintenant connu que plusieurs stress abiotiques sont associés à un groupe de composés chimiques dits les superoxydes. Ces molécules issues du métabolisme normal ou induites par des stress du milieu sont capables de causer de grands dommages aux cellules de la plante (Scandalios, 1990).

Les dommages de ces molécules vont de la simple inhibition des fonctions enzymatiques à la production de lésions aux protéines, aux acides nucléiques et à la peroxydation des lipides membranaires (Leigh, 1993). La réduction de l'intégrité de la membrane cellulaire causée par la peroxydation, en parallèle des dommages causés aux enzymes et aux structures des protéines et aux gènes qui les contrôlent, réduisent de l'efficacité du métabolisme de la plante et donc de son rendement (Leigh, 1993).

Des différences du point de vue plasticité ou réponse à ces facteurs, entre génotypes, peut être associée à la stabilité ou l'instabilité de la performance dans différents lieux. Ainsi Baker (1990) mentionne que plusieurs interactions de type cross over, observés chez le blé, étaient dues à des différences de résistance à des maladies ou à d'autres caractéristiques hautement hérissables de la plante. Kang et Gorman (1989) déduisent, de l'hétérogénéité de l'interaction GxE, les effets dus aux températures maximale, minimale, à la pluviométrie et à l'humidité relative. Le pourcentage de l'hétérogénéité déduite était égal à 9.61% du total de l'interaction. Des résultats similaires sont rapportés par Gorman *et al.*, (1989), Kang *et al.*, (1989) et Magari et Kang, (1993).

La notion de lieu englobe un ensemble de facteurs auxquels réagit la variété et qui constituent le plus souvent des facteurs limitants. Déterminer les facteurs du lieu qui constituent un frein aux performances des variétés est nécessaire pour mieux comprendre l'interaction et réduire de sa manifestation. Lecompte (2005) propose à cet effet le diagnostic agronomique qui vise à identifier les causes de variation des performances. Ce diagnostic est basé sur l'analyse de la variabilité des composantes du rendement, en comparant les valeurs observées à des références. Tout déficit permet d'identifier la phase du cycle cultural qui est affectée et les caractéristiques de milieu qui en sont la cause.

La méthode développée dans la présente étude pour approcher les facteurs qui induisent la variation du rendement et/ou de composantes, causant ainsi l'interaction génotype x lieux est inspirée des méthodes introduites par plusieurs auteurs. Ainsi pour interpréter l'interaction génotype x lieux, mise en évidence dans les essais de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), Baril *et al.*, (1995) utilisent les données météorologiques pour générer des variables environnementales. Parmi ces Co variables

figurent le nombre de jours de gel au cours de la première et la seconde quinzaine du mois d'avril, la température moyenne du cycle de la variété ainsi que le total de la radiation solaire.

Van Eeuwijk et Elgersma (1993) utilisent comme covariables les températures minimales et maximales, la pluviométrie, l'humidité relative et la vitesse du vent, des différentes phases de croissance du ray grass, pour identifier les causes explicatives de l'interaction présente dans les essais de cette espèce. Chez le blé, Vargas *et al.* (1998) utilisent les moyennes des températures maximales, minimales, les précipitations mensuelles et l'ensoleillement journalier, de la période de décembre à mars pour interpréter et expliquer l'interaction présente dans les essais multi locaux.

Van Eeuwijk *et al.*, (1995) utilisent le nombre de jours du mois de mai dont la température est inférieure à 10°C comme covariable dans l'analyse et l'interprétation de l'interaction exprimée chez le maïs. Chez la même espèce, Romay *et al.*, (2010) utilisent le nombre de jours dont la température maximale est supérieure à 25°C et le nombre de jours dont la température moyenne est supérieure à 15°C comme covariables explicatives de la variation inter sites du rendement du maïs.

Van Oosterom *et al.*, (1996) déterminent un indice de satisfaction journalière des besoin en eau (WSI) du millet (*Pennisetum glaucum*), à partir de la pluviométrie, l'évaporation du bac et le coefficient de la culture, Ces auteurs montrent que cet indice, calculé pour les périodes de post et pré- floraison, estimait correctement le degré de sévérité du stress hydrique de ces phases végétatives et expliquer de manière satisfaisante les différences de performances entre génotypes sur les différents lieux. La même procédure était suivie par Voltas *et al.*, (2005) pour déterminer un indice de tolérance au déficit hydrique (1-AW/ET), utilisé comme covariable pour l'interprétation des résultats des essais multi sites et multi localités des blés d'hiver et de printemps.

Aggarwal *et al.*, (1996) varient les paramètres génotypiques dans un modèle de simulation de la croissance du riz et réussissent à identifier des caractères morpho-physiologiques dont l'amélioration contribuerait à celle de la tolérance des stress et du potentiel de rendement. Hammer *et al.*, (1996) mentionnent que cette technique peut être utilisée pour générer d'hypothétiques génotypes adaptés à des environnements spécifiques.

Dans la présente étude une tentative a été entreprise pour expliquer partiellement la variation du rendement et des composantes du rendement chez trois variétés typiques de blé dur. Les résultats indiquent différentes réponses variétales, ce qui confirme la complexité des sources causales de la variation du rendement rencontrées par la culture du blé sur les hautes plaines orientales. Cette tentative, quoique timide, mérite une continuité pour confirmer l'effet des phénomènes identifiés dans le temps et l'espace. En effet les liaisons observées peuvent être fortuites.

A ce sujet, les mêmes modèles repris sur une période de 14 années (Haddad non publié) restent satisfaisant pour Waha et Bousselam. La réponse du cultivar MBB n'est pas totalement satisfaisante (R^2 non significatif). Ceci suggère que d'autres covariables méritent d'être introduites et testées dans le modèle de la régression progressive, l'utilisation des modèles de simulation n'est pas à écarter suite à la complexité du problème générer par la présence de l'interaction génotype x lieux et génotype x années (Kadi *et al.*, 2010, Meziani *et al.*, 2011, Nouar *et al.*, 2012, Adjabi *et al.*, 2014). La caractérisation des milieux (lieux et campagne) (Voltas *et al.*, 2005) ainsi que l'application de la méthode du diagnostic agronomique (Lecompte, 2005) ne sont pas des voies à écarter.

CONCLUSION

La variation, d'une année à l'autre, des quantités de pluies reçues, de leurs distributions et du régime des températures hivernales et printanières induit une forte variation des rendements grains. Sous ces conditions, les nouvelles obtentions doivent être adaptées à la variabilité du milieu de production pour lequel elles sont destinées.

Les résultats de la présente contribution montrent que Waha et Boussalem possèdent un potentiel de rendement significativement supérieur à celui de MBB. Ces variétés sont très tolérantes sous conditions difficiles donnant des rendements équivalents à ceux de MBB. Lors des campagnes plus favorables, Waha comme Boussalem arrivent à extérioriser des rendements plus élevés, produisant des gains équivalents à 16.6 et 24.5% du rendement moyen de MBB. Ces gains génétiques de rendement sont liés à des nombres de grains par m² et par épi élevés.

Un deuxième volet de ce travail montre des comportements très contrastées des trois cultivars étudiés. C'est ainsi que les résultats indiquent que MBB est sensible aux basses températures hivernales, Waha l'est au nombre de jours dont la température est supérieure ou égale à 25°C. Par contre Boussalem est sensible au déficit hydrique de fin de cycle. Ces différences de comportement et de réponses vis-à-vis des stress expliquent, en partie l'instabilité des rendements extériorisée par ces variétés.

Résumé : Pour augmenter la production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dont la demande de consommation est de plus en plus importante, la sélection cible des génotypes à haut potentiel de rendement, adaptés et tolérants les stress. Pour ce faire, la sélection multi sites est une étape nécessaire. La présente étude analyse la variation du rendement grain de 12 génotypes de blé dur qui ont été évalués sur cinq sites couvrant la variabilité agro climatique des hautes plaines. Les résultats indiquent la présence de l'interaction génotype x milieux du rendement grain qui varie de 1.23 à 4.71 t ha⁻¹. L'utilisation du modèle additif et la régression conjointe s'avèrent peu efficaces dans l'interprétation des résultats. L'AMMI explique, par contre, 90.8% de la somme des carrés des écarts de l'interaction. Cette analyse montre que le cultivar Waha présente une large adaptation à tous les sites. Badre, Setifis, Gaviota durum et Mrb5 présentent une adaptation spécifique aux différents sites. L'analyse GGE-biplot indique que les cinq milieux d'étude représentent trois sous-régions où Mrb3, Bousselam et Badre étaient les plus performants et présentent une adaptation spécifique aux différents sites. La sélection pour l'adaptation spécifique apporte un gain génétique de 10.5% comparativement à la sélection pour l'adaptation générale. Parmi les indices de stabilité utilisés, seul l'indice Pi associe performances de rendement et stabilité. Cet indice indique que Bousselam et Mrb3 sont performants et stables.

Mots clés. *Triticum durum*, adaptation, interaction, stabilité, rendement.

Abstract: To increase durum wheat (*Triticum durum* Desf.) production whose consumption demand is becoming more and more important, breeding is targeting adapted and stress tolerant genotypes having high yield potential. For achieving this objective multisite selection is a prerequisite. The present study analyses yield variation of 12 durum wheat genotypes which were tested in five sites covering the agro climatic variability of the high plains. The results indicated the presence genotype \times sites interaction of grain yield which ranged from 1.23 to 4.71 t ha⁻¹. The additive model and the conjoint regression were less efficient in interpreting the data set. AMMI analysis explained 90.80% of the interaction sum square. The analysis indicated that the cultivar Waha exhibited a general adaptation to all test sites. Badre, Setifis, Gaviota durum and Mrb₅ showed specific adaptation to different sites. While GGE-biplot analysis indicates that the five environments represented three sub-regions where Mrb₃, Bousselam and Badre were the winners. Selection for specific adaptation brought a genetic gain equal to 10.5% above selection for general adaptation. Among the stability indices utilized, Pi index associated grain yield performance and stability. This index identified Bousselam and Mrb₃ as high yielding and stable genotypes.

Key words. *Triticum durum*, adaptation, interaction, stability, grain yield.

INTRODUCTION

La culture du blé dur connaît un regain d'intérêt suite à la forte pression de la demande et à l'appui consenti par l'état notamment en matière du prix d'achat garanti aux producteurs qui est presque le double de celui proposé pour l'orge (4500 vs 2600 DA q⁻¹). L'aire de culture de cette espèce s'étend du subhumide au semi-aride, occupant plus de 1.2 millions d'hectares, en moyenne, au cours de la dernière décennie (FAO, 2010, Benbelkacem, 2013).

Quoiqu'il ait connu une augmentation sensible depuis le début des années 1990, le rendement du blé dur reste assez bas relativement aux performances qui sont réalisées de par le monde et surtout par les pays voisins (Hervieu *et al.*, 2006 ; Lattiri *et al.*, 2010). Cette faiblesse des rendements est attribuée à la rigueur des conditions climatiques du milieu de production (Chennafi *et al.*, 2006), aux techniques culturales appliquées qui restent peu performantes (Lahmar et Bouzerzour, 2010) et à la sensibilité du matériel végétal utilisé (Chennafi *et al.*, 2006, Mekhlouf *et al.*, 2006, Adjabi *et al.*, 2014).

L'Institut Technique des Grandes Cultures a contribué à l'amélioration des rendements de cette espèce, par la mise à la disposition des agriculteurs de nouvelles variétés relativement plus performantes. Les nouvelles obtentions sont cependant moins rustiques et moins tolérantes vis-à-vis des stress qui prévalent dans l'étagé bioclimatique semi-aride (Benmahammed *et al.*, 2010).

La recherche agronomique vise la sélection de lignées à haut potentiel de rendement, adaptées et tolérantes aux stress biotiques et abiotiques qui caractérisent le milieu de production. Indépendamment du progrès génétique réalisé, la performance d'un génotype est très variable selon les conditions pédoclimatiques dans lequel il est

cultivé et l'itinéraire technique auquel il est soumis. L'adaptation, conférée par la tolérance à la variation des milieux, représente la capacité du génotype à utiliser au mieux les disponibilités du milieu, en s'y harmonisant (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Nouar *et al.*, 2012, Adjabi *et al.*, 2014).

En milieux variables, Ceccarelli *et al.*, (2006) mentionnent que le processus de sélection doit différer de celui appliqué dans les milieux plus favorables et plus réguliers du point de vue production. Il est nécessaire de tenir compte de la tolérance des stress prévalant dans la zone ciblée (Reynolds *et al.*, 2012). L'identification de tels génotypes est difficile en présence d'interaction génotype x environnements (Kadi *et al.*, 2010 ; Meziani *et al.*, 2011).

Ceccarelli *et al.*, (2006) font observer que la recherche d'une large adaptation conduit à l'identification de peu de génotypes adaptés sur de vastes zones, où la variation climatique est très importante. Cette pratique réduit de la diversité génétique, augmente les risques d'obtention de faibles rendements et sous valorise la spécificité des terroirs.

De plus l'évolution du contexte de production, suite au réchauffement climatique (IPCC, 2007), renforce l'importance à accorder à l'adaptation spécifique. Malgré le fait que cette dernière stratégie peut constituer un frein au développement des variétés ainsi sélectionnées, vu les dimensions restreintes de leur marché, ceci peut être contre balancé par une meilleure performance de rendement grain.

Au niveau de l'exploitation, la variété est le facteur le plus facilement contrôlable comparativement aux variations engendrées par le milieu (date de semis, intrants, climat ect..). Les agriculteurs ne sont pas intéressés par des cultivars largement adaptés dans l'espace, mais plutôt par des cultivars dont le rendement est stable et qui sont

spécifiquement adaptés aux conditions locales de production.

L'étude et l'analyse de l'interaction offrent l'opportunité de sélectionner des génotypes à adaptation spécifique, montrant une interaction positive dans certaines localités seulement. Elles offrent aussi l'opportunité de sélectionner des génotypes à large adaptation, valorisant tous les milieux possibles (Annichiarico *et al.*, 2011). La question se pose aussi quels caractères faut-il privilégier dans le processus de sélection pour identifier des génotypes à adaptation spécifique et/ou à large adaptation aux environnements ciblés ?

La présence de l'interaction génotype x environnements nécessite la mise en place d'un réseau d'essais de comportement. Ces réseaux d'essais sont coûteux et mettent du temps à produire des résultats, alors que la durée de vie d'une variété devient de plus en plus courte (Brancourt-Hulmel et Lecompte, 2003).

Les résultats de tels réseaux d'essais sont diversement analysés (Zobel *et al.*, 1988 ; Baril *et al.*, 1995 ; Yan *et al.*, 2001 ; Mama *et al.*, 2008). Une de ces méthodes, l'analyse AMMI (Additive Model Multiplicative Interaction), analyse les effets principaux, génotypes et environnements, selon le modèle additif et analyse l'effet multiplicatif en utilisant les scores déduit de l'analyse en composantes principales de l'interaction (Gauch et Zobel 1988). Yan (2001) introduit la méthode 'GGE Biplot' qui utilise l'analyse AMMI, tout en éliminant l'effet environnement, pour se concentrer sur les effets génotypes et génotype x environnements.

La présente contribution a pour objectif d'analyser l'adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) évalués sur 5 sites (Harrouch, Khroub, Sétif, Sidi Bel Abbes et Saïda), très contrastés, au cours de l'année 2009/2010, en utilisant les méthodes de la régression conjointe, l'AMMI et le biplot GGE.

MATERIEL ET METHODES

1. Sites, géotypes et dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée sur cinq sites, représentant l'aire géographique où prédomine la culture du blé dur. Les sites expérimentaux, répartis sur les étages bioclimatiques subhumide et semi-aride, sont ceux du Khroub, Sétif, Harrouch, Sidi Bel Abbès et Saïda (Tableau 12).

L'essai a été conduit avec 12 variétés de blé dur (*Triticum turgidum* var *durum* L.) d'origines diverses (Tableau 13). Le dispositif expérimental, adopté par site, est celui des blocs aléatoires complets avec quatre répétitions.

Tableau 12. Caractéristiques des sites expérimentaux.

Ordre	Dénomination	Abrev.	Lat. (°)	long. (°)	Alt.(m)	Pluie (mm)
1	Harrouch	HC	37°09' N	8.6' E	132	674
2	Khroub	KR	36°25' N	6°6' E	713	520
3	Saïda	SD	34°3' N	0°8' W	1013	467.8
4	Sidi Bel Abbes	SB	35°2' N	0°3' W	554	418.1
5	Sétif	ST	36°12' N	5°24' E	1081	417.0

L'unité expérimentale est de 5 m de long par 1.20 m de large (6 rangs espacés de 0.20 m). 100 kg ha⁻¹ d'azote, sous forme d'urée, ont été appliqués en début de la période de croissance active de la végétation, au mois de mars.

Le contrôle des mauvaises herbes est effectué chimiquement par application de l'herbicide GandStar, à raison de 12.0 g ha⁻¹, après l'application de la fertilisation azotée. La fertilisation phosphatée est appliquée avant le semis à raison de 100 kg ha⁻¹ de super phosphate à 46%.

Tableau 13. Pedigree des lignées de blé dur évaluées sur les cinq sites expérimentaux en 2009/2010.

Génotype	Pedigree	Origine
Badre	Bousselam/Ofanto.CBDS# 7-2000-02-10S-06S-02S.	ITGC Sétif
Bousselam	Heider/Martes//Huevos de Oro	Cimmyt/Icarda
Essalem	Ofanto/Waha//Waha. CBDS# 3-2000-06-4S-1S-2S.	ITGC Sétif
Gaviota durum	Gaviota/durum 69//Egret/3/Winged. CD27516	Cimmyt/Icarda
Korifla =Cham ₃	DS.15/Gieger CD523-3Y-1Y-2M-0Y-0AP	Cimmyt/Icarda
M ^{ed} Ben Bachir	Sélection généalogique d'1 population locale	ITGC Sétif
Mrb3 =Cham ₅	Joric ₆₉ /Haurani L0589-4L-2AP-3AP-0AP	Cimmyt/Icarda
Mrb5	Joric ₆₉ /Haurani L0589-4L-2AP-5AP-0AP	Cimmyt/Icarda
Ofanto	Appulo/Valnova	Italie
Setifis	Ofanto/Waha//MBB.CBDS# 5-2000-04-20S-16S-8S.	ITGC Sétif
Vitron= Hoggar	Turkey77/3/Jori/Anhinga//Flamingo	Cimmyt/Icarda
Waha =Cham ₁	Pelicano/Ruffino//Gaviota/Rolette. CM 77194	Cimmyt/Icarda

2. Analyse des données

Les données du rendement grain ont fait l'objet d'une analyse de la variance par site expérimental pour tester l'effet génotype et identifier les meilleurs génotypes par site. Le modèle additif adopté est le suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij}$$

où :

Y_{ijk} = valeur du génotype i dans la répétition ou bloc j.

μ = Moyenne générale de l'expérimentation.

α_i = Effet du génotype i .

β_j = Effet du bloc j .

e_{ij} = Erreur résiduelle

Une analyse de la variance combinée du rendement grain des différents sites qui montrent un effet génotype significatif a été faite selon le modèle :

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + S_j + (G \times S)_{ij} + e_{ijk}$$

où

Y_{ijk} = est le rendement du génotype i sur le site j et la répétition k ,

μ = est la grande moyenne,

G_i = est l'effet moyen du génotype i ,

S_j = est l'effet moyen du site j ,

$(G \times S)_{ij}$ = est l'interaction du génotype i sur le site j ,

et

e_{ijk} = est l'erreur pondérée (MacIntosh, 1983).

Pour décomposer la composante d'interaction $(G \times S)_{ij}$, en vue d'identifier des génotypes à large adaptabilité et éventuellement des génotypes à haut rendement ayant une adaptation spécifique, les modèles de la régression conjointe et l'AMMI sont utilisés. La méthode de la régression conjointe est décrite par Finlay et Wilkinson (1963).

Dans cette méthode l'interaction $(G \times S)_{ij}$ est subdivisée en deux composantes : $b_i S_j$ et d_{ij} , qui représentent, respectivement, la régression linéaire de l'interaction du génotype i sur l'indice du site j et la déviation de la régression. La pente b est déterminée pour chaque génotype ainsi que la contribution de chaque génotype à l'interaction $(G \times S)_{ij}$ et sa déviation de la régression. Cette dernière représente la variance S^2_{di} d'Eberhart et Russel (1966), qui est une mesure de la stabilité du génotype considéré.

L'interaction $(G \times S)_{ij}$ est subdivisée aussi selon le modèle AMMI décrit entre autres par Gauch et Zobel (1988):

$$(G \times S)_{ij} = \sum_{n=1}^N \lambda_n u_{ni} v_{nj} + r_{ij}$$

Où

\sum = est la somme des $n=1, 2, \dots, N$ axes de l'analyse en composantes principales (PCA) intégrant le modèle,

λ_n = est la valeur propre de l'axe n ,

u_{ni} = est le vecteur propre du génotype i sur l'axe n ,

v_{nj} = est le vecteur propre du site j sur l'axe n ,

et

r_{ij} = est la résiduelle de l'interaction.

Les analyses ont été faites avec le logiciel cropstat 7.2.3 (2009), utilisant la procédure « cross site analysis » qui donne simultanément les résultats de l'analyse AMMI et celle de la régression conjointe. Dans cette procédure l'effet site est testé

relativement à l'effet blocs hiérarchisés aux sites ; l'effet génotype est testé par rapport à l'interaction GxS qui est testée par rapport à la résiduelle pondérée.

La déviation de la régression et la résiduelle de l'AMMI sont testées par rapport à la résiduelle pondérée ; alors que l'hétérogénéité de la régression et les moyennes des carrés des écarts des IPC₁ et IPC₂ sont testées par rapport à leur résiduelle respective.

La stabilité spatiale est mesurée en utilisant l'indice de la supériorité génotypique (Pi) de Lin et Binns (1988), la stabilité AMMI proposée par Purchase *et al.*, (2000) et la variance inter sites (Lin *et al.*, 1986). Le coefficient de corrélation de rang de Spearman (r_s) des paramètres statistiques mesurant la stabilité est calculé avec le logiciel Past (Hammer, 2001).

Les GGE-biplot ont été réalisés avec les scores des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales (IPC1 et IPC2) en utilisant le logiciel GGE-biplot software (Yan, 2001) pour produire les graphes indiquant:

- (i) "which-won-where" pattern,
- (ii) Classement des génotypes sur la base de la performance de rendement et de la stabilité,
- (iii) Classement des environnements sur la base de la capacité de discrimination et de la représentabilité,

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Performances de rendement intra et inter sites

L'analyse de la variance du rendement grain, par site, indique un effet génotype significatif, pour l'ensemble des localités, suggérant l'existence de la variabilité génétique utilisable en sélection par site (Tableau 14). La moyenne de rendement grain, par site, varie de 1.23 à 4.71 t ha⁻¹, respectivement sur les sites extrêmes Harrouch et Khroub (Tableau 15). Ces valeurs indiquent la diversité des milieux rencontrés par la culture du blé dur sous les conditions pédoclimatiques algériennes. Par génotype, l'amplitude des rendements extrêmes est parfois plus importante, allant de 1.00 à 5.65 t ha⁻¹, comme c'est le cas du génotype Badre (Tableau 15).

Hormis la variété Mohammed Ben Bachir (MBB) qui n'est pas sélectionnée sur aucun site, les autres génotypes figurent parmi les meilleurs au moins une fois. Bousselam et Mrb₃ se classent parmi les meilleurs sur quatre sites, alors que Waha l'est sur trois sites (Tableau 15). Ces trois derniers génotypes présentent la moyenne des rendements inter sites (Yi.) la plus élevée. Le classement de MBB en dernière position sur l'ensemble des sites confirme le progrès génétique réalisé par les nouvelles obtentions comme le mentionnent Nouar *et al.*, (2010). Le fait que chaque site identifie un jeu spécifique de génotypes performants est indicateur d'une interaction génotype x environnements significative.

L'analyse combinée du rendement grain de l'ensemble des sites confirme la présence d'une interaction génotype x sites (GxS) significative (Tableau 16). Avec 88.6%, l'effet site est la source de variation la plus importante, alors que la somme des carrés de l'interaction G x L n'explique que 8.0% de la somme des carrés de l'effet traitement qui est la somme des effets site, génotype et leur interaction (Tableau 16). L'effet génotype

n'est pas significatif, ce qui est en contradiction avec les conclusions des analyses faites par site qui montrent l'existence de la variabilité génétique (Tableau 14).

Tableau 14. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance du rendement grain mesuré par site.

Source	ddl	ST	KR	HR	SB	SD
Répétition	3	0.145 ^{ns}	0.046 ^{ns}	0.085 ^{ns}	0.056 ^{ns}	0.043 ^{ns}
Génotype	11	1.450 ^{**}	1.463 ^{**}	0.108 ^{**}	0.417 ^{**}	0.571 ^{**}
Résiduelle	33	0.246	0.078	0.023	0.047	0.168
Cv (%)	--	13.9	6.1	12.5	9.1	11.0

ns, ** : effet non significatif et significatif au seuil de 1%.

Ceci suggère d'analyser l'interaction qui génère des changements de classement des génotypes et qui fait, qu'en moyenne, on n'observe pas d'effet génotype significatif. Dans le cas de la présence d'interaction significative, le modèle additif de l'analyse de la variance conduit le plus souvent à tirer la conclusion que chaque site doit être analysé séparément suite à sa spécificité. La généralisation des résultats à plus d'un site, n'est pas possible alors qu'elle est d'un grand intérêt pour le sélectionneur (Francia *et al.*, 2011 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Yan *et al.*, 2000).

2. Adaptation au milieu

L'utilisation de la régression conjointe pour modéliser le comportement génotypique sur les sites tests, comme le suggèrent Finlay et Wilkinson (1963) n'est pas utile, dans le cas de la présente étude, vu que l'hétérogénéité des régressions n'est pas significative (Tableau 16).

Yau et Hamblin (1994) font observer que la régression conjointe est une technique efficace uniquement lorsque l'hétérogénéité des régressions est significative et qu'elle explique une part importante de l'interaction. Les variances mesurant la contribution de chaque génotype à l'interaction ($CME_{G \times S}$) et la déviation de la régression (σ^2_{di}) ne sont significatives que pour deux variétés : Badre et Sétifis.

Comparativement à l'effet non significatif de la régression conjointe, les deux premières composantes principales (IPCA₁, IPCA₂) de l'analyse AMMI sont significatives et expliquent 90.80% de la SCE de l'interaction (Tableau 16). Suite aux valeurs élevées prises par leurs scores sur l'IPCA₁, les sites Harrouch, Khroub, Sétif et Saïda sont une source appréciable d'interaction GxS (Figure 31).

Samonte *et al.*, (2008) signalent que plus les valeurs des composantes IPCA1 et IPCA2 d'un génotype sont élevées, en valeur absolue, plus le génotype présente une adaptation spécifique à l'environnement près duquel il est positionné. Lorsque ces valeurs sont proches de zéro, origine des deux axes, le génotype en question est stable et mieux adapté à l'ensemble des environnements testés. Par contre, le site Sidi Bel Abbes contribue nettement moins.

De par leur position le long de l'axe de l'effet moyen (Yi.), Mrb3 et Essalem occupent les positions extrêmes et présentent aussi des interactions opposées (Figure 31). Mrb3 montre une adaptation aux sites de Sétif et Khroub, alors qu'Essalem est plutôt adaptée au site Saïda. Aucune variété n'est adaptée spécifiquement aux sites de Sidi Bel Abbes et Harrouch, qui se montrent non discriminants vis-à-vis des variétés testées (Figure 31).

Du point de vu sélection le biplot AMM₁ suggère l'alternative de la sélection pour l'adaptation spécifique, cependant comme l'ICPA₂ contribue aussi, et d'une manière importante à l'explication de l'interaction, c'est la lecture du biplot AMM₂ qui définira la stratégie de sélection à adopter en fonction de l'adaptation et de la stabilité des différents génotypes évalués. Le biplot AMM₂ indique que Waha présente une faible interaction et de ce fait il est largement adapté à tous les sites tests (Figure 32).

Tableau 15. Rendements moyens des géotypes évalués sur cinq sites au cours de la campagne 2009/10.

Géotype	ST	KR	HR	SB	SD	Yi.
Badre	2.80	5.65 ^a	1.00	2.60	4.11 ^a	3.23
Bousselam	4.37 ^a	5.01	1.47 ^a	2.71 ^a	3.68 ^a	3.45
Essalem	2.86	4.11	0.92	1.99	3.83 ^a	2.74
Gaviota durum	3.55	4.26	1.33 ^a	2.29	4.10 ^a	3.10
Korifla	3.97 ^a	5.13	1.23	2.31	3.33	3.19
M ^{ed} B. B.	3.94	3.90	1.18	2.24	3.44	2.94
Mrb ₃	4.61 ^a	4.98	1.32 ^a	2.97 ^a	3.78 ^a	3.53
Mrb ₅	3.19	4.11	1.28 ^a	2.43	4.11	3.02
Ofanto	2.84	4.15	1.37 ^a	2.06	3.42	2.77
Setifis	3.69	5.59 ^a	1.05	2.50	2.96	3.16
Vitron	3.22	4.53	1.37 ^a	1.95	4.16 ^a	3.05
Waha	3.82	5.04	1.25 ^a	2.78 ^a	3.76 ^a	3.33
Y.j	3.57	4.71	1.23	2.40	3.72	3.13
Ppds5%	0.71	0.40	0.22	0.31	0.59	

a = géotypes à haut rendement grain, dont les moyennes ne sont pas différentes significativement au seuil de 5% selon le test de la Ppds. ST=Sétif, KR= Khroub, HR= Harrouch, SB= Sidi Bel Abbes, SD= Saïda.

Tableau 16. Analyse de variance du rendement grain (t ha⁻¹) selon les modèles de la régression et l'AMMI₂

Source de variation	ddl	SCE	CME	Fobs	test F	R ² (%)
Traitement	59	388.2	6.58	--	--	--
Site (S)	4	344.08	86.02	1146.93	**	88.6
Bloc /S	15	1.13	0.075	0.68	ns	---
Géotype (G)	11	13.08	1.19	1.68	ns	3.36
G x S	44	31.04	0.71	6.45	**	8.0
Hétérogénéité de la régression	11	5.56	0.5	0.64	ns	17.9
Déviation de la régression	33	25.68	0.78	7.09	**	----
IPC1	14	15.76	0.41	2.56	**	50.8
IPC2	12	12.4	1.01	6.31	**	40.0
Résiduelle	18	2.88	0.16	1.45	ns	---
Résiduelle pondérée	165	18.65	0.11			--

ddl= degrés de liberté, SCE= somme carrées des écarts, CME= carrées moyens des écarts, R²(%)= pourcentage de la SCE expliquée par rapport au total traitement et par rapport à la SCEGxS ; ICP1 , ICP2= première et deuxième composantes principales de l'interaction

Waha est un témoin dans la présente étude, il est largement cultivé à travers tout le territoire national où il occupe près de 40% de la sole réservée à la production de semence du blé dur. Bousselam et Mrb₃ sont spécifiquement adaptés au site de Sétif. Bousselam est une sélection de l'ITGC de Sétif, dans cette wilaya, elle connaît un début d'adoption appréciable aux cotés de Waha et MBB. Badre et Setifis montrent une

adaptation au site du Khroub, alors que Gaviota durum s'adapte mieux au site de Harrouch et Mrb5 au site de Saïda (Figure 32).

Tableau 17. Rendement et gain de rendement attendu de la sélection pour l'adaptation générale et l'adaptation spécifique.

Site	Géno.	RDT	indice	Géno.	RDT	indice
Adaptation Générale				Adaptation Spécifique		
HA	Waha	3.26		Gta durum	3.25	
KH	Waha	3.46		Badre	4.13	
SA	Waha	3.14		Mrb ₅	3.55	
SBA	Waha	3.35		Waha	3.35	
SET	Waha	3.44		Mrb ₃	4.12	
	Moyenne	3.33	100	Moyenne	3.68	110.5

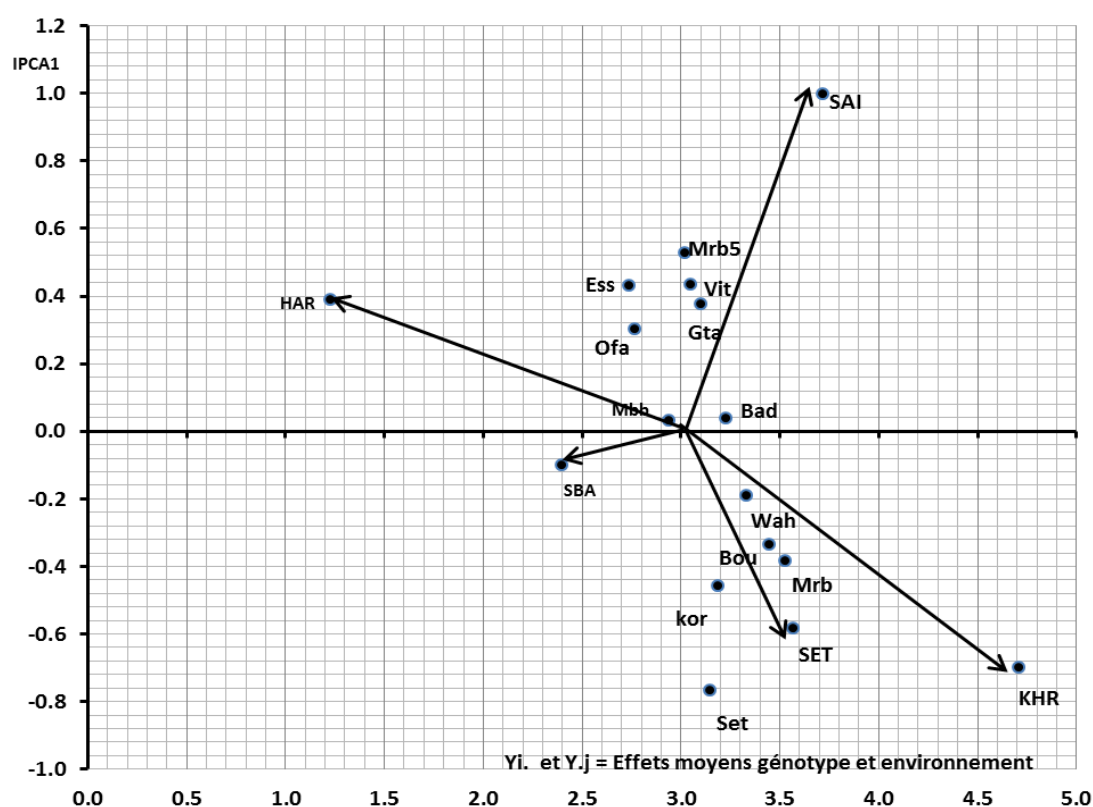


Figure 31. Biplot AMM1 des effets moyens génotypes et sites et les scores de l'IPCA₁ (HAR= Harrouch, KHR = Khroub, SAI = Saïda, SBA= Sidi Bel Abbès, SET= Sétif).

Comparativement au choix de Waha qui montre une adaptation générale, la sélection des génotypes qui montrent une adaptation spécifique aux différents sites (Gta's dur pour Harrouch, Badre pour Khroub, Mrb5 pour Saïda, Waha pour SBA et Mrb3 pour Sétif) apporte un gain génétique de 10.51% du rendement du témoin Waha (Tableau 17).

3. La stabilité des performances inter sites

La recherche d'un potentiel de rendement élevé est intéressante dans le cas où les performances sont liées à la stabilité dans l'espace et dans le temps. L'indice de la supériorité génotypique P_i est une mesure conjointe de ces deux caractéristiques (Lin et Binns, 1988). Les faibles valeurs de cet indice sont indicatrices à la fois de performance élevée et de stabilité. Les valeurs de cet indice sont négativement corrélées avec les rendements marginaux des différents génotypes, suggérant que les génotypes aux faibles valeurs de P_i (Bousselam et Mrb3) sont les plus performants sur l'ensemble des sites et les plus stables (Tableaux 18, 19, Figure 33).

Tableau 18. Valeurs de l'indice de la supériorité génotypique, la variance inter sites et la stabilité AMMI des 12 génotypes.

Génotype	P_i	σ^2_j	ASV	Génotype	P_i	σ^2_j	ASV
BAD	0.331	3.04	0.96	Mrb3	0.06	2.13	0.63
BOU	0.069	1.96	0.51	Mrb5	0.442	1.45	0.67
ESS	0.582	1.74	0.56	OFA	0.593	1.2	0.39
GTA	0.307	1.58	0.52	SET	0.235	2.77	1.04
KOR	0.139	2.26	0.58	VIT	0.319	1.87	0.56
MBB	0.407	1.44	0.64	WAH	0.115	2	0.25

La variance inter sites, la plus faible, est celle du génotype Ofanto. Elle est positivement corrélée avec les rendements marginaux des différents génotypes, suggérant que les génotypes stables (Ofanto) sont les moins performants (Tableaux 18,

19, Figure 33). La stabilité AMMI (ASV) indique que Waha et Ofanto sont les plus stables, présentant les plus faibles valeurs de l'ASV qui ne montre aucune relation avec les performances génotypiques (Tableaux 18, 19).

La sélection de lignées de blé dur à haut potentiel de rendement, adaptées et tolérant les stressés est un important axe de la recherche agronomique pour réduire de la dépendance du marché extérieur. La sélection des variétés présentant une large adaptation est désirable, mais elle est rendue difficile par la présence de l'interaction génotype x milieu (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005 ; Annichiarico *et al.*, 2005 ; Kadi *et al.*, 2010). Pour pallier à cette difficulté, les sélectionneurs tentent d'exploiter positivement l'interaction en sélectionnant pour l'adaptation spécifique pour valoriser la spécificité des différentes zones agro climatiques (Sinebo, 2005 ; Annichiarico *et al.*, 2006 ; Benmahammed *et al.*, 2010).

Les résultats de la présente étude confirment la présence de l'interaction du rendement grain qui varie largement de 1.23 à 4.71 t.ha⁻¹ selon les sites. Cette importante variation reflète la diversité des milieux rencontrés par la culture du blé dur sous les conditions pédoclimatiques algériennes. En effet, l'effet site absorbe 88.6% de la somme des carrés des traitements laissant uniquement 8.0% pour l'interaction.

Ces résultats corroborent ceux de Kadi *et al.*, (2010), sur orge. L'utilisation de la régression conjointe pour modéliser le comportement génotypique sur les différents sites est apparue inutile vu que l'hétérogénéité des régressions est non significative. Les deux premières composantes de l'AMMI expliquent, par contre, 90.80% de la somme des carrés des écarts de l'interaction. Cette analyse indique que 4 sites sur 5 sont une source appréciable et significative d'interaction génotype x environnements.

Tableau 19. Coefficients de corrélation de Spearman (r_s) entre les différents paramètres mesurant la stabilité et la moyenne des rendements (Y_i) des 12 génotypes évalués sur les 5 sites.

Paramètres	Y_i	P_i	σ^2_i	ASV
Y_i		0.0000	0.0092	0.9828
P_i	-0.9171		0.0332	0.7617
σ^2_i	0.7133	-0.6154		0.2207
ASV	-0.0070	0.0981	0.3818	0

Coefficient au dessous et probabilité correspondante au dessus de la diagonale

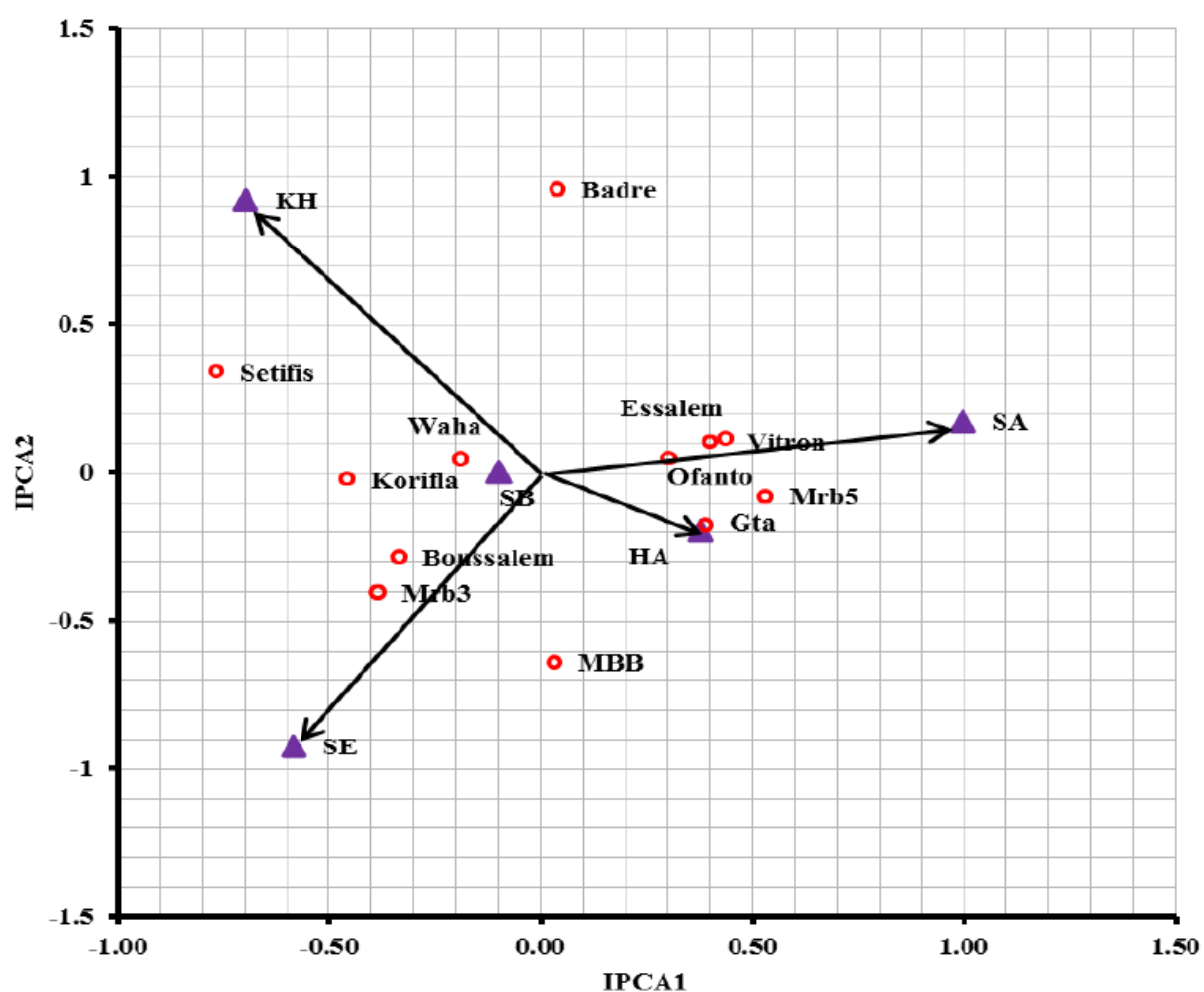


Figure 32. Biplot AMMI₂ des scores des génotypes et des sites sur les IPCA₁ et IPCA₂ (HA= Harrouh, KH= Khroub, SA = Saïda, SB= Sidi Bel abbés, SE= Sétif).

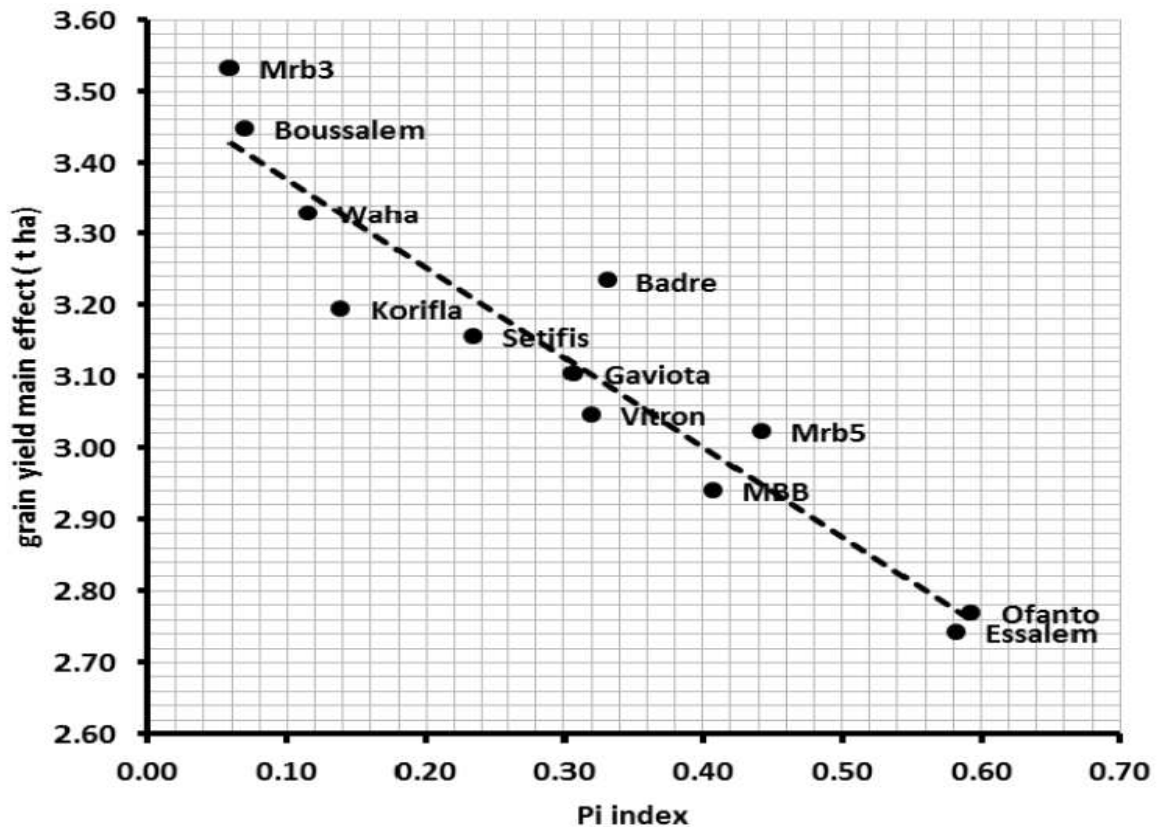


Figure 33. Relations entre les valeurs de l'indice Pi et le rendement génotypique marginal (Yi.).

Le cultivar Waha présente une large adaptation à tous les sites. Badre, Setifis, Gaviota durum et Mrb₅ présentent une adaptation spécifique aux différents sites. La sélection pour l'adaptation spécifique apporte un gain génétique de 10.51% comparativement à la sélection pour l'adaptation générale. Parmi les trois indices de stabilité utilisés seul l'indice Pi indique que Boussalem et Mrb3 sont performants et stables, la variance inter sites suggère qu'Ofanto est stable et peu performant, alors que l'ASV n'est pas associée à la performance de rendement, elle indique que Waha et Ofanto sont les plus stables.

4. L'analyse GGE

4.1. Définition des sous régions et identification du meilleur génotype par sous-région

L'analyse GGE permet d'identifier les génotypes potentiellement adaptés à des sous régions et ceux qui présentent une large adaptation. Yan et Kang (2003) proposent de relier les marqueurs des cultivars vertex par des segments de droite pour former un polygone. Des droites passant par l'origine et perpendiculaire aux différents coté du polygone sont matérialisées pour définir les différentes sous régions ou zones potentielles (Yan *et al.*, 2000; Yan et Hunt, 2002). Le génotype vertex de chaque sous-région est le winner de cette zone.

Les deux premières composantes principales expliquent 82.6% de la variation totale du GGE (Figure 34). Le polygone tracé forme cinq sous régions différentes. Deux sous régions (SR2 et SR4) n'ont pas de sites d'évaluation qui leur est spécifique. Les sous régions SR1 et SR3 sont présentées, respectivement, par les sites expérimentaux de Saida et Harrouch. Par contre la cinquième sous-région (SR5) est représentée par trois sites expérimentaux qui sont Khroub, Sidi Bel Abbes et Sétif (Figure 34).

Les génotypes les plus performants par sous-région sont Mrb3 pour la sous-région SR5, Badre pour la sous-région SR1 et Ofanto pour la sous-région SR3, représentée par le site Harrouch (Figure 34). Les génotypes Mrb5 et Korifla performement médiocrement sur l'ensemble des sites d'évaluation. Ces résultats, s'ils se répètent, suggèrent de retirer de l'évaluation deux sites sur les trois qui représentent la sous-région SR5. Kang *et al.*, (2006) mentionnent que la méthode GGE-Biplot permet d'identifier les cultivars qui ont des adaptations spécifiques aux différents sites d'évaluation.

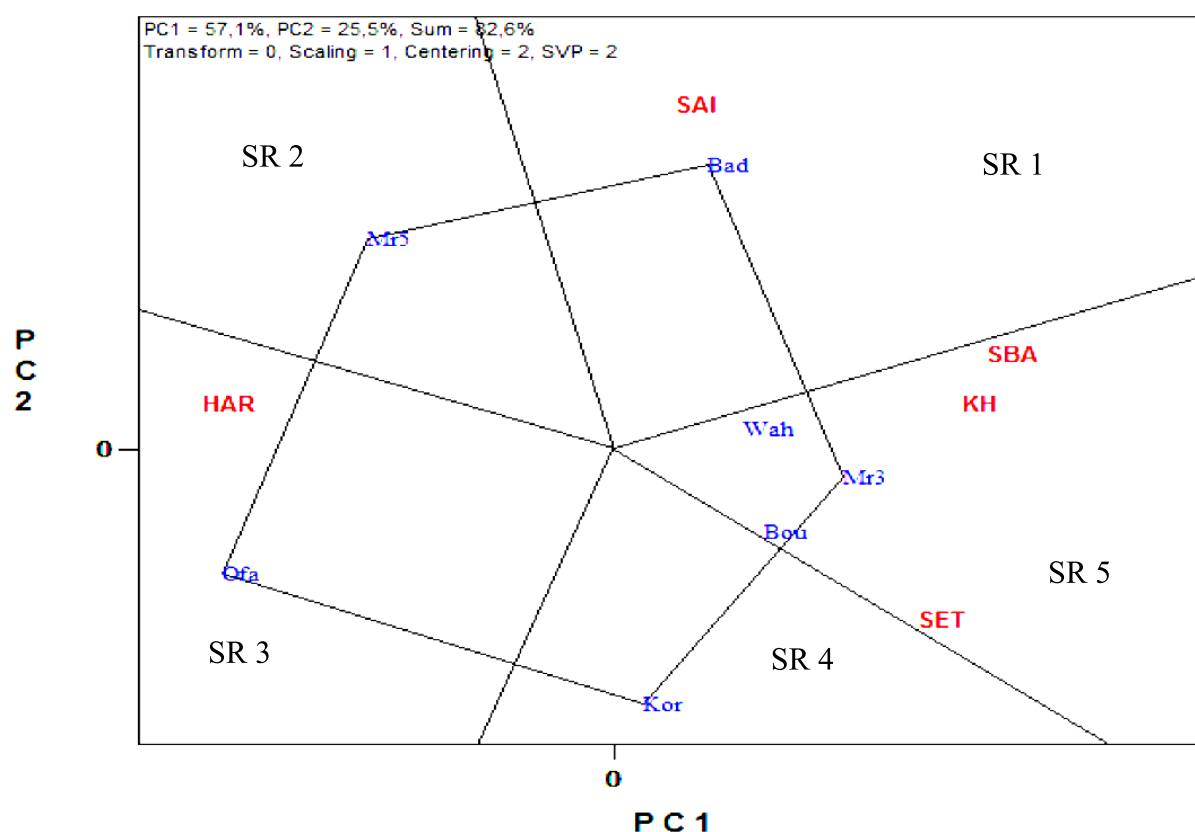


Figure 34. Sous régions et génotypes performants ou « which-wins-where ».

4.2. Discrimination et représentativité des sites d'évaluation

Les droites partant de l'origine et joignant les marqueurs des différentes localités représentent les vecteurs des localités. L'angle formé par les vecteurs de deux localités est proportionnel au coefficient de corrélation entre ces deux localités. Le cosinus de cet angle est une approximation du coefficient de corrélation (Yan, 2002). Un angle obtus est indicateur d'une corrélation négative entre les deux localités concernées et suggère une interaction G x L élevée (Yan et Tinker, 2006). Ainsi dans le cas de la présente étude, les angles par le vecteur du site Harrouch et les vecteurs des sites Khroub, Sidi bel Abbes et Sétif sont obtus, suggérant que le classement des génotypes évalués est totalement différent sur les deux ensembles de sites, à cause de la présence de l'interaction G x L (Figure 35).

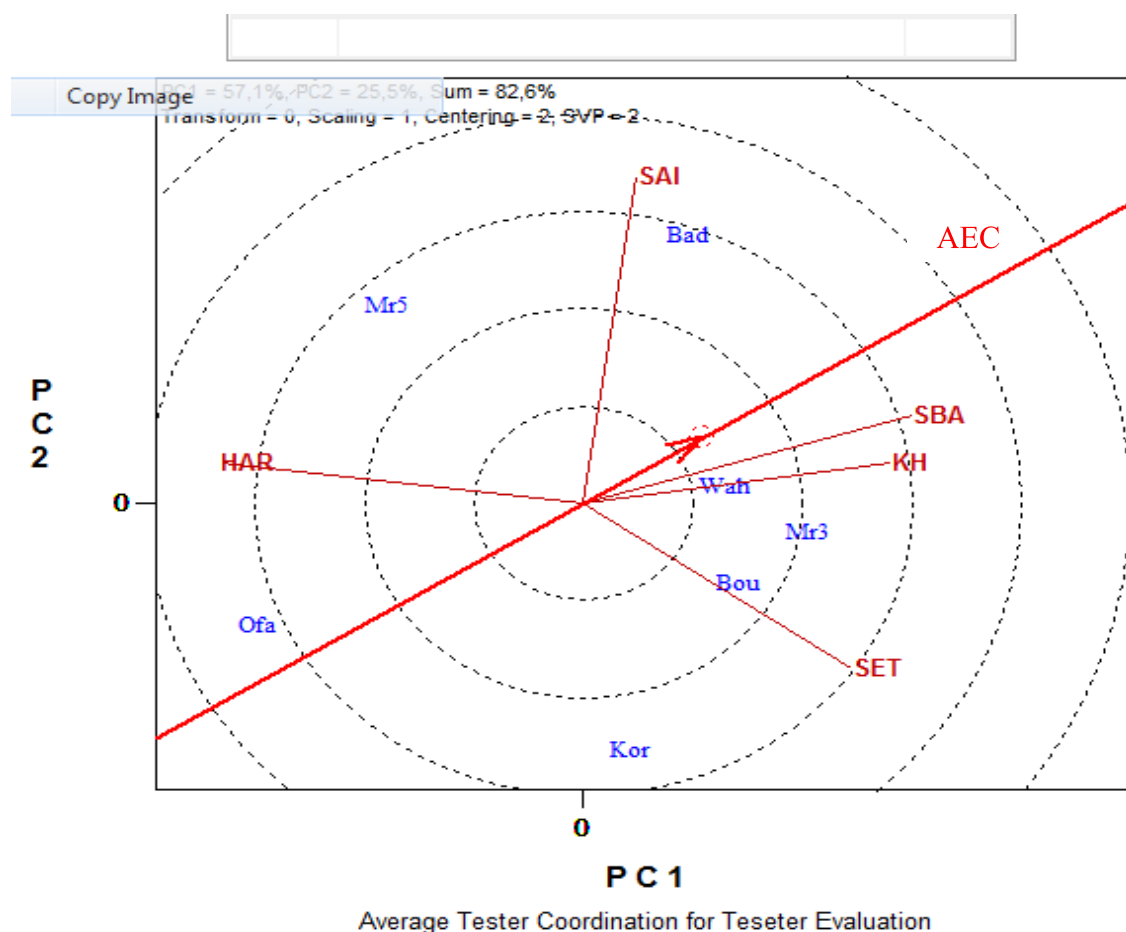


Figure 35. Classement des sites en fonction de la capacité de discrimination et de la représentativité.

La longueur du vecteur-localité est une mesure de la capacité de cette localité à discriminer entre les différents génotypes évalués. Un long vecteur-localité indique que la localité concernée est discriminante du comportement variétal, en termes de performances (apte à favoriser l'expression des différences de performance entre les génotypes évalués).

L'axe de l'environnement moyen (AEA = average-environment axis) est schématisé par un vecteur qui passe par l'origine et porte un petit cercle à sa terminaison. Cet axe représente l'environnement moyen de toutes les localités (Yan, 2001). Une localité, dont l'angle qu'elle forme avec l'AEA a un cosinus de faible valeur, est plus représentative (classe les génotypes de manière similaire ou proche du

classement moyen fait sur l'ensemble des localités ou environnements) que les autres environnements testés.

Dans le cas de la présente étude et de par la longueur des vecteurs des différentes localités, les sites Saida, Harrouch et Sidi bel Abbes sont les plus discriminants, suivis de près par les sites du Khroub et de Sétif (Figure 35). Les vecteurs des sites Sidi Bel Abbes et Khroub sont plus proches de l'axe de l'environnement moyen (AEC) (Figure 35). De ce fait, ces deux sites sont très représentatifs pour la réalisation des tests d'évaluation de l'interaction GxL. Selon Yan et Tinker (2006), les environnements discriminants et représentatifs sont plus appropriés pour la sélection des génotypes à large adaptation.

4.3. Performance et stabilité génotypiques

Le génotype désirable, adapté à la région ciblée, doit avoir une performance et une stabilité élevées. Le vecteur 'AEA' est orienté dans le sens de l'augmentation de la performance, ordonnant ainsi les différents génotypes. La droite, orientée dans les deux sens et passant par l'origine, est indicatrice de la variabilité (instabilité des performances) dans les deux directions. Ainsi un génotype dont la droite de projection sur le vecteur AEA est courte est plus stable qu'un génotype dont la droite de projection est plus longue (Figure 36).

Ainsi dans le cas de la présente étude, l'ordre de performance, en moyenne, des génotypes évalués est le suivant : Badre > Mrb3 > Waha > Bousselam > Mrb5 > Korifla > Ofanto (Figure 36). Les variétés Mrb5, Korifla et Ofanto ont des performances inférieures à la grande moyenne parce qu'elles sont situées en bas de l'axe AEA, alors que les variétés Badre, Mrb3, Waha et Bousselam ont des performances supérieures à la

grande moyenne et sont situées proches du génotype idéal, matérialisé par un petit cercle (Figure 36).

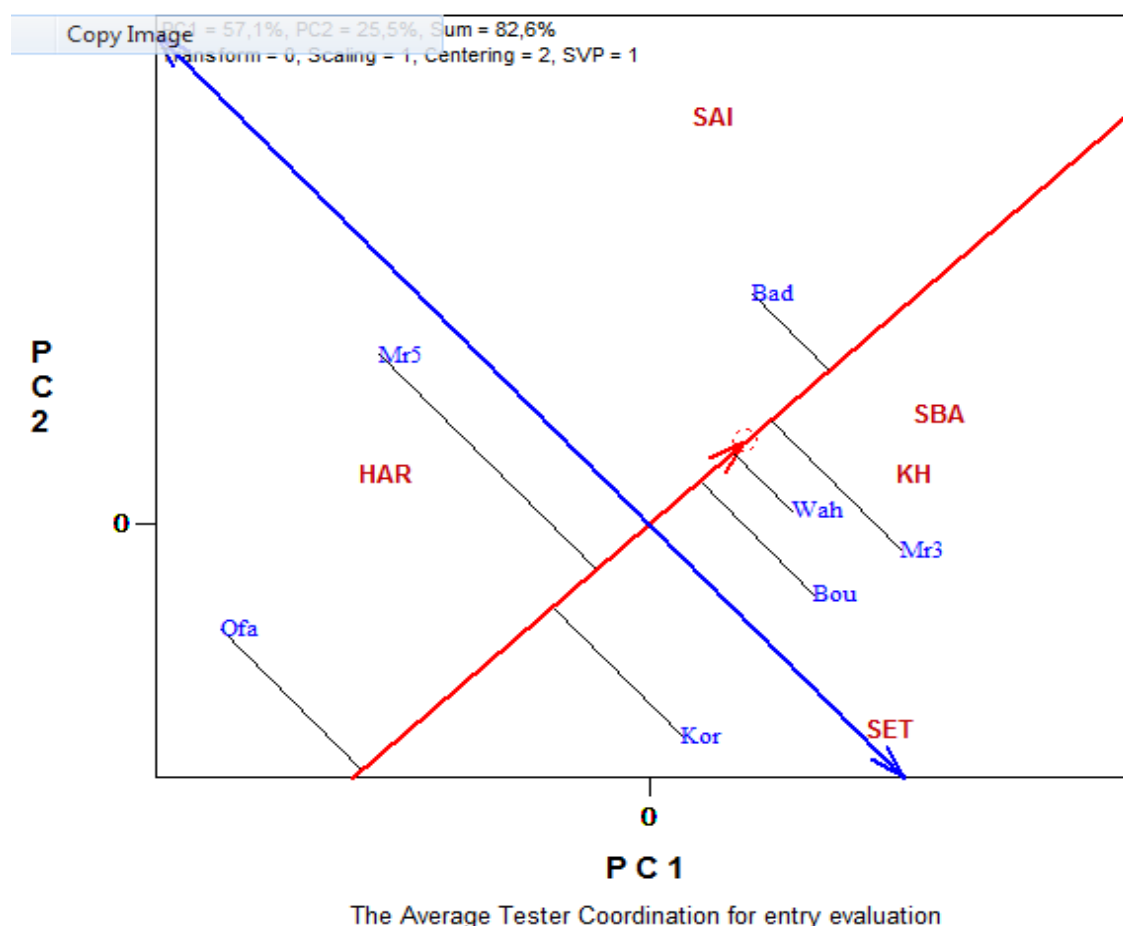


Figure 36. Classement des génotypes sur la base de la performance et de la stabilité.

La comparaison des longueurs des droites de projection sur l'axe AEA indique que le cultivar Waha est le plus stable et proche du génotype idéal du point de vue performance et stabilité. Il est suivi par Badre qui est le plus performant en moyenne. Mrb5 est la variété la plus instable (Figure 36).

Le positionnement des différentes variétés est localisé du côté des sites où elles réalisent la meilleure performance (Figure 36). Ainsi Badre performe le mieux sur le site de Saida, à Harrouch les meilleures variétés sont Ofanto et Mrb5 et sur le groupe

des sites du Khroub, Sétif et Sidi Bel Abbès, c'est Mrb3, Waha et Bousselam qui sont les plus performantes.

4.4. Performance par site

Souvent on est intéressé de connaître le classement des différents génotypes dans une localité donnée ou de comparer le classement dans différentes localités pour les besoins d'identifier les sites de sélection. Ainsi deux sites qui classent différemment les génotypes doivent être retenus comme sites d'évaluation. Par contre les sites qui classent de manière similaire les différents génotypes, forment une sous-région et un seul de ces sites mérite d'être retenu pour le testage du matériel végétal (Annichiarico *et al.*, 2005).

Pour ce faire on trace la droite orientée dans le sens de l'augmentation de la performance, passant par l'origine et qui relie la localité d'intérêt pour laquelle on cherche le classement des génotypes. Cette dernière est indiquée par une flèche. Les figures 37 et 38 montrent le classement des différentes variétés sur les sites du Khroub et de Sétif. On note que ces sites classent les meilleurs génotypes de manière similaire. En effet hormis le mauvais classement de Korifla et Badre, les deux sites classent les variétés Mrb3, Waha et Bousselam comme étant les plus performantes (Figures 37 et 38).

En moyenne, les deux génotypes, les plus performants, sont Badre et Mrb3, on est intéressé de connaître comment performant ces deux génotypes sur les différents sites ou localités. Les figures 39 et 40 montrent ce classement. Ainsi Badre montre la meilleure performance sur le site Saida, puis sur les sites suivants Sidi Bel Abbès > Khroub > Harrouch > Set ; alors que Mrb3 présente la meilleure performance sur le site de Sidi Bel Abbès, puis sur les sites Khroub \approx Sétif > Saida > Harrouch (Figures 39 et 40).

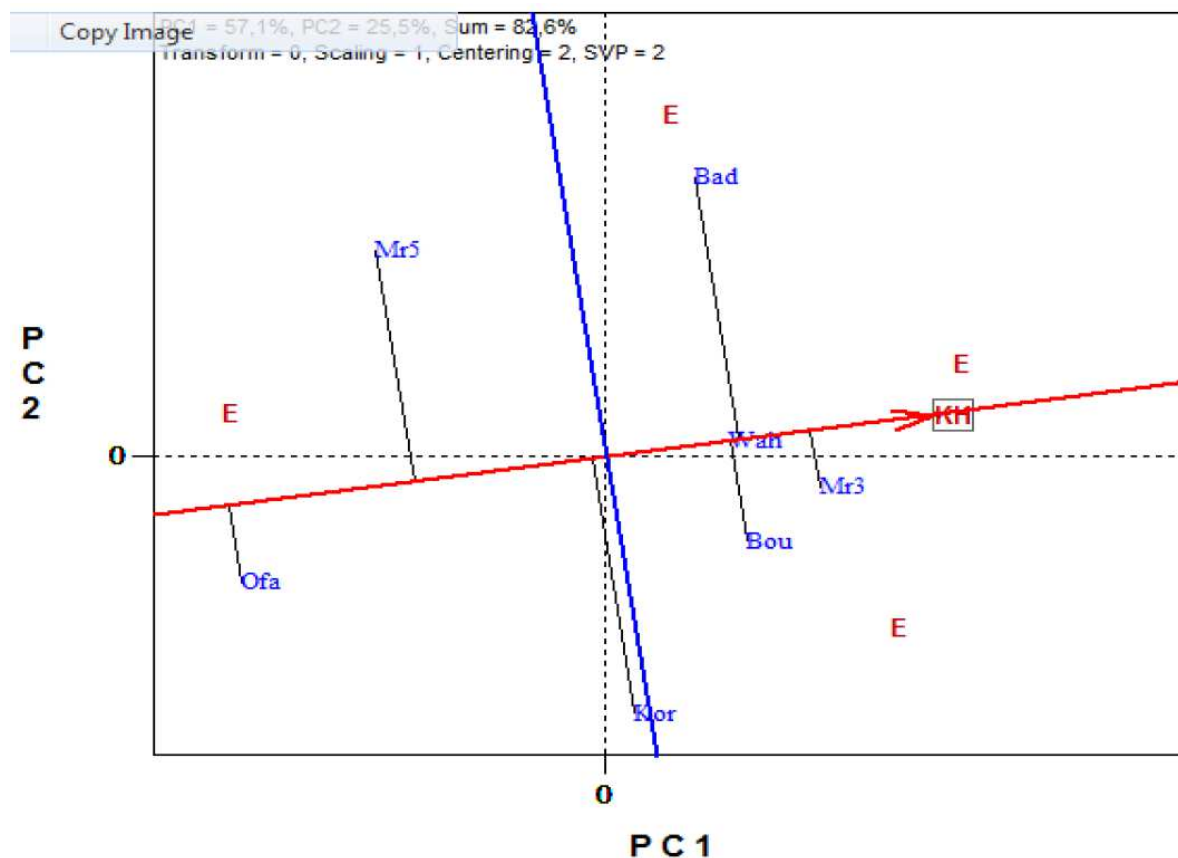


Figure 37. Comparaison des performances des génotypes sur le site du Khrub.

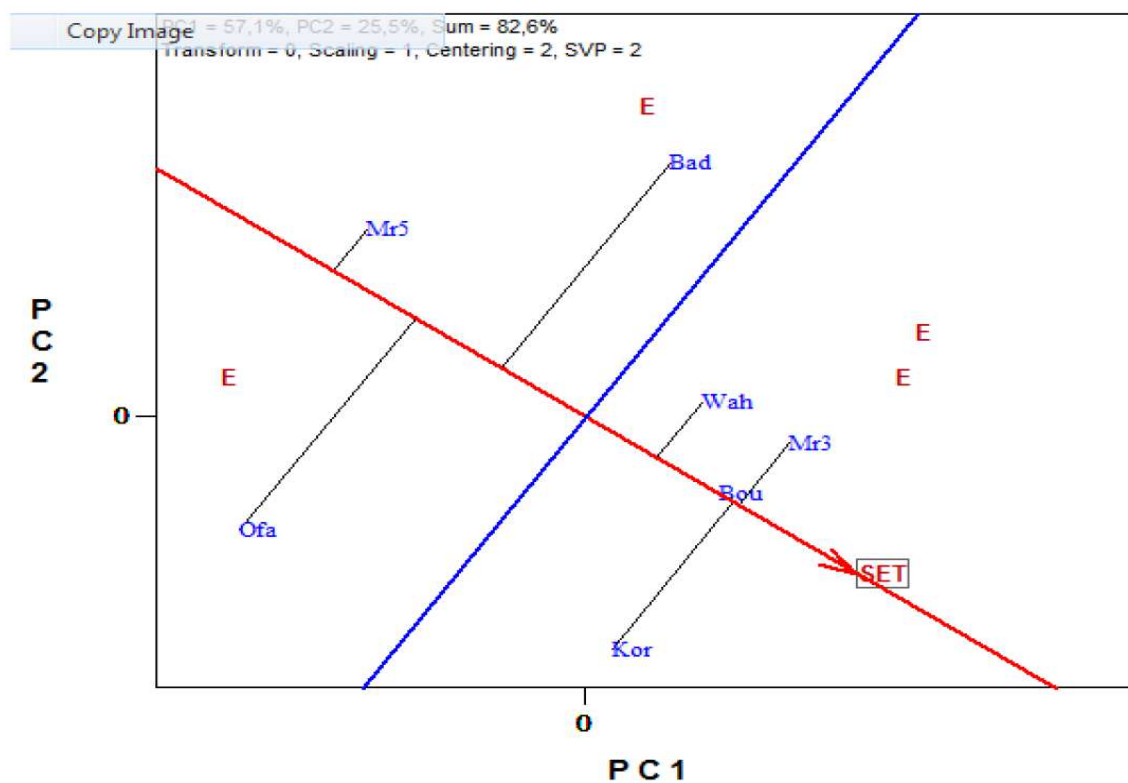


Figure 38. Comparaison des performances génotypiques sur le site de Sétif.

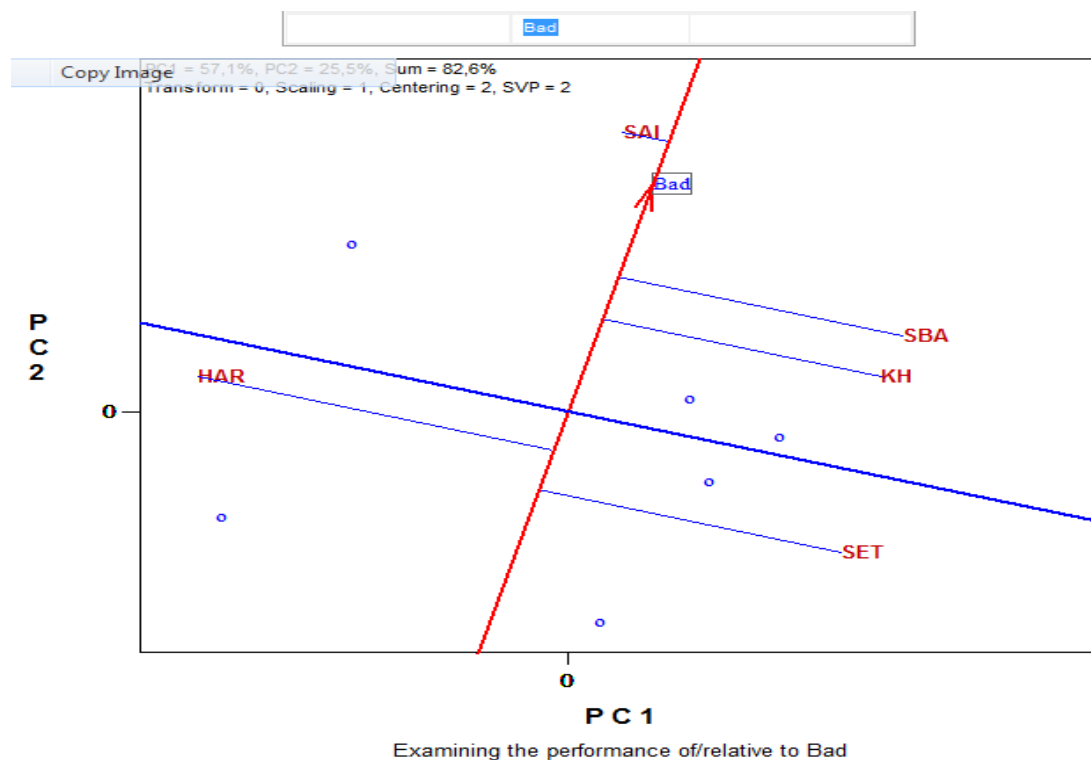


Figure 39. Classement des sites en fonction de la performance du génotype Badre.

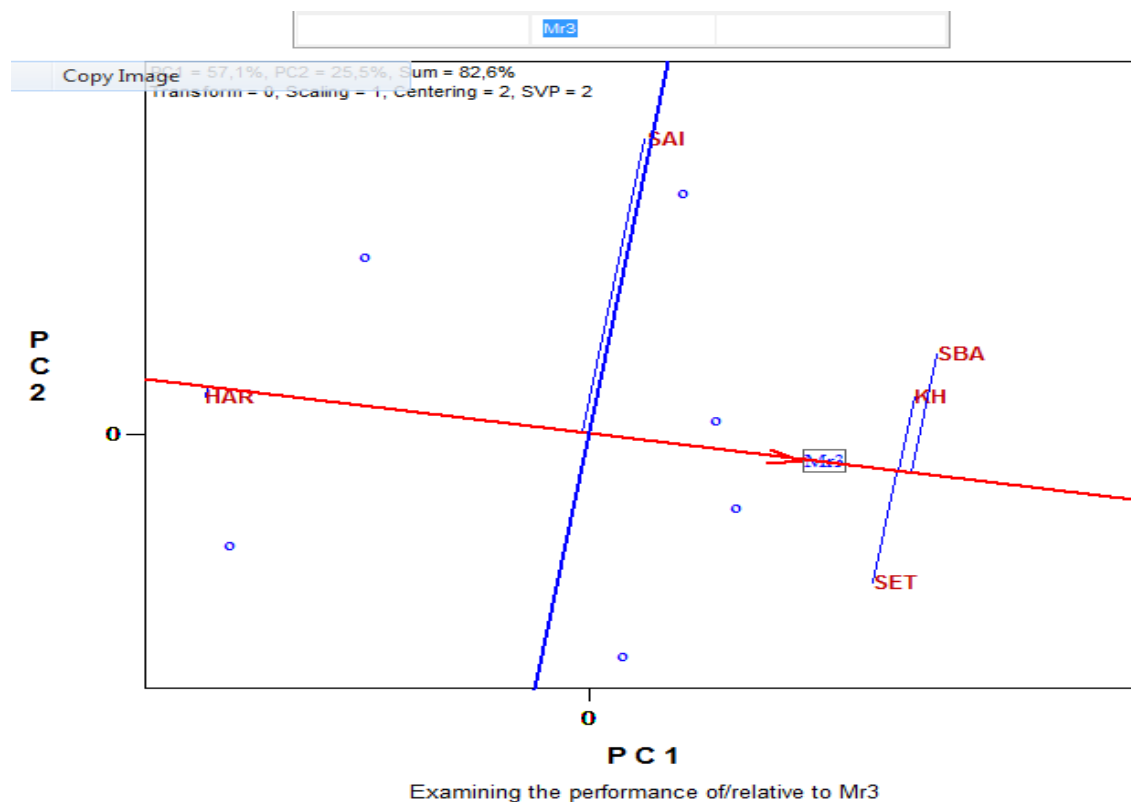


Figure 40. Classement des sites en fonction de la performance du génotype Mrb3.

Les résultats de la présente étude vont dans le même sens que ceux de plusieurs recherches, en ce qui concerne l'identification des sous-régions, les plus contrastées et les plus intéressantes pour la sélection et l'évaluation du matériel végétal. En effet, Yan *et al.*, (2000) utilisent la méthode GGE pour montrer que les zones céréalières canadiennes peuvent être groupées, uniquement, en deux sous-régions comparativement aux quatre sous-régions qui sont traditionnellement reconnues.

Il en est de même pour Yan et Rajcan (2002) qui utilisent cette technique pour identifier la sous-région qui est une source d'interaction. Dehghani *et al.*, (2006) utilisent la technique GGE pour identifier trois sous-régions différentes pour la production de l'orge (*Hordeum vulgare*) en Iran.

Queme *et al.*, (2007) utilisent l'analyse GGE pour grouper les sites d'évaluation en environnements plus ou moins homogènes et pour identifier les génotypes qui sont performants dans chaque sous-région et ceux qui montrent une large adaptation à toutes les sous régions identifiées. Glaz et Kang (2008), utilisant la méthode GGE, identifient des sites d'évaluation qui sont redondants pour la sélection de la canne à sucre en Floride.

Ramburan et Van Der Berg (2011) identifient 4 méga environnements pour la canne à sucre qui diffèrent essentiellement par l'altitude. Ils identifient, utilisant cette technique, les génotypes à adaptation spécifique et ceux qui montrent une large adaptation. Sharma *et al.*, (2010) utilisent cette technique pour déterminer la performance, la stabilité, et la supériorité des lignées de blé tendre d'hiver conduites sous irrigation, en inde.

Yan et Hunt (2001) corrélient les scores des génotypes et des milieux sur les deux premiers axes de l'analyse GGE aux caractères génotypiques et facteurs des milieux

utilisés comme covariables. Ils montrent que la hauteur de la végétation et la durée du cycle jusqu'à la maturité étaient les principales causes génotypiques de l'interaction GxE, alors que les basses températures hivernales et les températures élevées de fin du cycle étaient les principales causes environnementales de l'interaction.

La comparaison des différentes méthodes utilisées (régression conjointe, AMMI et GGE) laisse apparaître que la régression conjointe n'est pas satisfaisante pour analyser et interpréter l'interaction génotype x lieux blé dur évalué sous diverses conditions pédoclimatiques, vu que l'hétérogénéité des régressions n'est pas statistiquement significative.

L'AMMI se montre plutôt satisfaisante dans l'interprétation de l'interaction. Ces résultats indiquent que le cultivar Waha présente une large adaptation, les sites les plus discriminants sont khroub, Sétif et Saïda, alors que SBA ne l'est pas et Harrouch l'est moins. Les génotypes à adaptation spécifique sont Mrb3 à Sétif, Badre au Khroub et Mrb5 à Saïda.

L'analyse GGE confirme la stabilité du cultivar Waha, et indique en plus que ce cultivar est proche du génotype idéal. Elle indique que la région couverte par les essais multi locaux est constituée de trois sous-régions différentes, qui sont représentées par Saïda, Harrouch et Khroub+ Sétif+ Sidi Bel Abbes, suggérant de retirer deux sites qui sont redondants au niveau de la troisième sous-région. Les génotypes qui performant le mieux (winners) dans ces trois sous-régions sont Mrb3, Badre et Ofanto.

Elle indique aussi que les sites Harrouch et Sidi bel Abbes classent différemment les génotypes, ils doivent être pérennisés pour l'évaluation variétale. Les sites les plus discriminants sont Saïda, Harrouch et Sidi Bel Abbes. Les sites les plus représentatifs sont Sidi bel Abbes et Khroub. Le site de Sidi Bel Abbes est discriminant et

représentatif. Les résultats indiquent aussi que Mrb5 est la variété la plus instable. L'utilisation de l'indice Pi révèle que le couple de génotypes Bousselam et Mrb3 est le plus stable et le plus performant. Cette comparaison indique que la méthode GGE est plus riche en informations, en ce qui concerne le comportement variétal et serait d'une aide précieuse pour le sélectionneur pour identifier les sites les plus pertinents pour l'évaluation, sélectionner les génotypes à large adaptation et ceux qui montrent une adaptation spécifique et éliminer les sites redondants.

CONCLUSION

Le développement de variétés à potentiel élevé de rendement couplé à une large adaptabilité est un objectif important dans l'amélioration des plantes. La présence de l'interaction génotype avec l'environnement joue un rôle crucial dans la détermination des performances de matériel végétal testé dans différents milieux et sur des années différentes.

Les résultats de cette étude montrent que, sous les conditions pédoclimatiques de la campagne 2009/2010, le rendement du blé dur est très affecté par la variation des sites, des génotypes et de leur interaction. L'analyse AMMI explique une grande part de l'interaction et identifie les génotypes à large adaptation comme Waha qui est le plus recommandé pour l'ensemble des sites comme nouvelle variété pour la grande culture et aussi comme témoin, et ceux montrant une adaptation spécifique tels Gaviota durum, Badre, Mrb5, Waha et Mrb3 respectivement pour les sites Harrouch, El Khroub, Saïda, Sidi Bel Abbes et Sétif.

Les estimations des rendements attendus pour les différentes stratégies de sélection indiquent que l'adoption d'une stratégie qui exploite positivement l'interaction sur les sites à haut potentiel de production et l'adaptation générale pour les sites au potentiel relativement plus faible permet d'améliorer les rendements grains. La sélection pour l'adaptation spécifique aboutit à un gain génétique de 10.51%. L'indice Pi et la méthode des rangs du génotype de l'analyse GGE-biplot indiquent que les génotypes Boussalam, Mrb3 et Waha associent performance de rendement et stabilité.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une culture ancestrale qui occupe une place importante dans les habitudes alimentaires de la population. Conduite en pluviale cette culture est soumise à la variabilité climatique qui se traduit par des contraintes hydriques et thermiques erratiques, notamment dans l'étage bioclimatique semi-aride. Malgré les efforts déployés en matière de développement, entre autres l'introduction de nouveaux facteurs de production et la tentative de mise en place d'une agriculture intensive, cette spéculation reste caractérisée par des variations notables liées aux paramètres climatiques qu'il est difficile de maîtriser, provoquant une interaction génotype x environnements significative.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse apporte de nouvelles connaissances pour améliorer les performances du blé dur conduit en pluvial sous climat semi-aride. Tout d'abord, il a permis de mettre en évidence les performances agronomiques des nouvelles obtentions Waha et Bousselam relativement à la variété Mohamed Ben Bachir, ainsi que leurs gains génétiques. La réponse différentielle des trois variétés aux milieux à la variation climatique, a été également étudiée pour déterminer les facteurs limitants qui expliquent la variabilité du rendement et de ses composantes.

MBB est une variété à cycle relativement plus long que celui de Waha et Bousselam. Un hiver froid affecte la matérialisation des sites des grains par épi. Il retarde aussi la croissance et allonge ainsi le cycle, lui faisant subir les effets des hautes températures terminales qui réduisent du nombre d'épis. Le même phénomène est opérant chez Waha, avec cependant cette différence que l'effet du froid hivernal est plus marquant chez MBB alors que celui des hautes températures l'est chez Waha. Bousselam est plutôt sensible au manque d'eau de fin de cycle. Ces différents comportements engendrent des interactions génotype x environnements. Dans ce

contexte, les études éco physiologiques sont très utiles pour identifier les facteurs limitants et valoriser les génotypes à adaptation spécifique. Il semble donc qu'il faut trouver, introduire et cribler le matériel végétal pour la tolérance au froid hivernal ; et parmi ce matériel sélectionner pour l'esquive et/ou la tolérance des stress de fin de cycle qui sont les hautes températures et le déficit hydrique.

Ce travail a également montré l'intérêt d'utiliser des méthodes statistiques telles que la régression conjointe, les modèles AMMI et GGE pour analyser et interpréter les données collectées à partir d'un réseau d'essais multi-locaux.

La régression conjointe cherche à décomposer l'interaction par la prise en compte du niveau moyen de la variable expliquée (rendement grain) dans chaque site, présente l'avantage de ne pas nécessiter de données supplémentaires, et de consommer très peu de degrés de liberté. Mais la part d'interaction à expliquée dans notre cas n'est pas significative. De plus, l'interprétation des résultats sera limitée car on ne sait pas relier les parts d'interaction expliquées à des caractéristiques du milieu autres que "milieux à faible ou fort potentiel", et on ne peut décrire les génotypes que par une estimation de leur stabilité ou par leur aptitude à bien ou mal valoriser les potentialités des milieux.

Le modèle AMMI a permis d'obtenir la décomposition de l'interaction de 90.80%. Cette analyse indique que 4 sites sur 5 sont une source appréciable et significative d'interaction génotype x environnements. La variété Waha montre une large adaptation à tous les environnements tests. Badre, Mrb3, Gaviota durum et Mrb5 présentent une adaptation spécifique aux différents sites. La sélection pour l'adaptation spécifique aboutit à un gain génétique de 10.5%.

Le modèle « which-wins-where » permet d'identifier les génotypes potentiellement adaptés à des sous-régions spécifiques. Les deux premières composantes principales expliquent 82.60% de la variation totale du GGE. Deux sous régions (SR2 et SR4) n'ont pas de sites d'évaluation qui leur est spécifique. Les sous régions SR1 et SR3 sont présentées, respectivement, par les sites expérimentaux de Saida et Harrouch. Par contre la cinquième sous-région (SR5) est représentée par trois sites expérimentaux qui sont Khroub, Sidi Bel Abbas et Sétif.

Le génotype Badre est spécifique au site Saïda (SR1), Ofanto au site Harrouch (SR3), Mrb3 l'est aux sites Khroub, Sidi Bel Abbas et Sétif (SR5), alors que Bousselam présente une adaptation spécifique à Sétif (SE), le cultivar Waha qui se trouve au centre du polygone présente une adaptation générale aux différents sites d'expérimentation. Les génotypes Mrb5 et Korifla performement médiocrement sur l'ensemble des sites d'évaluation.

Ainsi pour l'évaluation de la performance moyenne du rendement et la stabilité des génotypes, un génotype idéal est celui qui présente une valeur de CP1 élevée correspondant à un rendement élevé, et une valeur de CP2 proche de zéro correspondant à une grande stabilité. Pour cela, notre étude a révélé le génotype Badre présentant la valeur la plus élevée sur l'axe CP2, donc c'est le mois stable, alors que Mrb3, Waha et Bousselam sont les plus productifs et les plus stables.

Dans le cadre d'un travail futur, il serait souhaitable de :

- Etablir une stratégie de sélection des variétés reproductives et résistantes aux différentes conditions climatiques.
- Travailler sur une plus grande variabilité génétique avec un maximum de croisement, et la réalisation des cultures *in vitro* afin d'aboutir à un génotype modèle.

- Comprendre les mécanismes de résistance aux stress biotiques et abiotiques.
- Utiliser des marqueurs moléculaires spécifiques qui pourraient être liés à l'adaptation et au rendement.

A terme, les résultats de ce travail pourront être valorisés dans la construction d'un outil d'aide à la sélection des variétés de blé dur adaptées à la région de Sétif, tout en intégrant les agriculteurs dans les programmes de sélection.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abbassenne, F., H. Bouzerzour, L. Hachemi. 1998. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride d'altitude. *Annales Agronomiques de l'INA* (Alger), 18 : 24- 36.
2. Abbate, P.E., F.H. Andrade, J.P. Culot. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci. Camb.*, 124:351–360.
3. Abbate, P.E., F.H. Andrade, J.P. Culot, P.S. Brindaban. 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Res.*, 54: 245–257.
4. Abdullah, M., Aziz-Ur-Rehman, N. Ahmad, I. Rasul. 2007. Planting time effect on grain and quality characteristics of wheat. *Pak. J. Agri. Sci.*, Vol. 44 (2): 200-202.
5. Acevedo, E., P. Silva, H. Silva. 2002. Wheat growth and physiology. In: Curtis, B.C., Rajaram, S., Gomez Macpherson, H. (Eds.), *Bread Wheat, Improvement and Production. FAO Plant Production and Protection Series*, p. 30.
6. Adjabi A., H. Bouzerzour, C. Lelarge, A. Benmahammed, A. Mekhlouf, A. Hannachi. 2007. Relationships between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean conditions. *Pakistan Journal of Agronomy*, 6: 294-301.
7. Adjabi A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2014. Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Grain Yield. *Journal of Agronomy*, 13: 131-139.
8. Aggarwal P.K., M.J., Kropff, P.S. Teng, G.S. Khush. 1996. The challenge of integrating systems approaches in plant breeding: opportunities, accomplishments and limitations. In *Applications of systems approaches at the field level* (Eds. M J Kropff, P S Teng P. K. Aggarwal, B.A.M. Bouman, J Bouma & H H Van Laar). *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands. pp. 1-24.

9. Ahn, S.N., J.A. Anderson, M.E. Sorrels, S.D. Tanksley. 1993. Homoeologous relationships of rice, wheat and maize chromosomes. *Mol. Gen. Genet.*, 241: 483-490.
10. Ali Dib, T., P. Monneveux, J.L. Araus. 1992. Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. II. Caractères physiologiques d'adaptation. *Agronomie*, 12 : 159–167.
11. Al-Khatib K., G.M. Paulsen. 1984 Mode of high temperature in jury to wheat during grain development. *Physiol plant*, 61: 363-368.
12. Amigues J.P., P. Debaeke, B. Btner, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas. 2006. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau (Sécheresse et agriculture). *Expertise scientifique collective, synthèse du rapport*, INRA (France), 72 p.
13. Annicchiarico P., F. Bellah, T. Chiari. 2005. Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Science*, 45: 1741-1749.
14. Annichiarico, P., F. Bellah, T. Chiari. 2006. Repeatable genotype location interaction and its exploitation by conventional and Gis-Based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Eur.J. Agro.*, 24 : 70-81.
15. Annicchiarico P., E. Chiapparino, M. Perenzin. 2010. Response of Common Wheat Varieties to Organic and Conventional Production Systems Across Italian Locations, and Implications for Selection. *Field Crops Research*, 116(3): 230–238.
16. Annicchiarico, P., L. Pecetti, H. Bouzerzour, R. Kallida, A. Khedim, C. Porqueddu, N.M. Simões, F. Volaire, F. Lelièvre. 2011. Adaptation of contrasting cocksfoot plant types to agricultural environments across the Mediterranean basin. *Environ. Exp. Bot.*, 74: 82-89.

17. Araus J.L., T. Ali Dib, M. Nachit. 1998. Chlorophyll fluorescence as a selection criterion for grain yield in durum wheat under Mediterranean condition. *Field crops Res.* 55: 209-224.
18. Araus, J.L., G.A. Slafer, M.P. Reynolds, C. Royo. 2002. Plant breeding and water relations in C3 cereals. What should we breed for? *Ann. Bot.* 89: 925-940.
19. Assem, N., L., El Hafid, B., Haloui, K. El Atmani. 2006. Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental. *Science et changements planétaires/ Sécheresse*. Volume 17, Numéro 4: 499-505.
20. Austin R.B., J. Bingham, RD. Blackwell, LT. Evans, MA. Ford, CL. Morgan, M. Taylor. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agri. Sci.* 94: 675–689.
21. Ayeneh A., Ginkel M., Reynolds M.P., Ammar K. 2002. Comparison of leaf, spike, peduncle, and canopy temperature depression in wheat under heat stress. *Field Crops Res.*, 79: 173-184.
22. Bahlouli F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2008. Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 12(1): 31-39.
23. Bahlouli F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, K.S. Hassous. 2005. Selection of high yielding and risk efficient Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Pak. J. Agro.*, 4: 360-365.
24. Baker R. J., 1990. Crossover genotype-environmental interaction in spring wheat, Genotype-by-Environment interaction and plant breeding (ed M.S kang) Louisiana state university Baton rouge Louisiana pp 42-51.

25. Baril C.P., J.B. Denis, R. Wustman, F.A. van Eeuwijk. 1995. Analysing genotype by environment interaction in Dutch potato variety trials using factorial regression. *Euphytica*, 82: 149-155.
26. Becker, H.C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica*, 30: (835-840
27. Belhassen E., D. This, P. Monneveux. 1996. l'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahiers d'Agriculture*, 4: 251-261.
28. Belkherchouche H., S. Fellah, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, N. Chellal. 2009. Vigueur de la croissance, translocation et rendement grain du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Courrier du savoir*, 9:17-24.
29. Benbelkacem A. 2013. Rapport des résultats du projet "Enhancing Food Security in Arab Countries' Icarda-INRAA. 35 pages.
30. Benmahammed A., KL. Hassous, H. Bouzerzour. 2001. Synthèse des performances des nouvelles sélections d'orge (*Hordeum vulgare* L.) réalisées par les stations ITGC de Saida, Sidi Bel Abbés, Tiaret, Beni Slimane, Oued Smar, Khémis Miliana, Sétif et Khroub, au cours de la période 1980/81 à 1996/97. *Céréaliculture*, 36: 13 20.
31. Benmahammed A., Djekoun A., Bouzerzour H., Hassous K.L. 2004. Efficacité de la sélection précoce de la biomasse chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride. *Revue Sciences et Technologie C22* (Université de Constantine): 80-85.
32. Benmahammed, A., Kribaa M., Bouzerzour H., Djekoun A., 2010a. Assessment of stress tolerate in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semi-arid conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Euphytica*. 172 (3): 383-394.
33. Benmahammed A., H. Nouar, L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Bouzerzour. 2010b. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14: 177-186.

34. Bennet, S.J., N. Saidi, D. Enneking. 1998. Modelling climatic similarities in Mediterranean areas: a potential tool for plant genetic resources and breeding programmes. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 70: 129–143
35. Bensemane L. 2004. Contribution à l'étude de la cinétique d'accumulation et répartition de la matière sèche chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de magister, Faculté des sciences, Université de Sétif, 80pp.
36. Bensemane L., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, H. Mimouni. 2011. Assessment of the phenotypic variation within two- and six-rowed barley (*Hordeum vulgare* L.) breeding lines grown under semi-arid conditions. *Advanced environmental Biology*, 5: 1454-1460.
37. Blum, A., Poiarkova, H., Golan, G., Mayer, J. 1983. Chemical desiccation of wheat plants as a simulator of post-anthesis stress. I. Effect on translocation and kernel growth. *Field Crops Res.*, 6: 51.
38. Blum, A., Y. Pnuel, 1990. Physiological attributes associations with drought resistance of wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.*, 42: 799-810.
39. Blum, A. 1985. Photosynthesis and transpiration in leaves and ears of wheat and barley varieties. *Journal of experimental botany*, 36: 432-440.
40. Blum, A. 1988. Plant breeding for stress environments. *CRC, Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA*, 223p.
41. Blum, A. 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20: 135-148.
42. Bouzerzour H., Zerargui H., Fellahi N. 1990. Quelques variétés de blé sélectionnées pour les Hauts plateaux de l'Est. *Céréaliculture* 23: 11- 18.
43. Bouzerzour H., A. Djekoun, A. Benmahammed, K.L. Hassous. 1998. Contribution de la biomasse aérienne de l'indice de récolte et de la précocité à l'épiaison au

- rendement en grain (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Cahiers de l'Agriculture*, 8: 133-137.
44. Bouzerzour, H., A. Benmahammed. 2009. Variation in early growth, canopy temperature, translocation and yield of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under semi-arid conditions. *Jordan Journal of Agricultural Science*, 5 :142-154.
 45. Bozzini, A., 1970. Genetica e miglioramento genetico dei frumenti duri. *Genet. Agr.*, 24: 145–193.
 46. Bozzini A. 1988. Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. In: Fabriani G. et Lintas C. (éd). *Durum: Chemistry and Technology*. AACC (American Association of Cereal Chemists), Inc. St. Paul, Minnesota, États-Unis. pp 1-16.
 47. Brancourt-Hulmel M, V. Biarnès-Dumoulin, JB. Denis. 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plants. *Agronomie*, 17 : 219–246.
 48. Brancourt-Hulmel, M. et C. Lecombe., 2003. Effet of environmental varieties on genotypes environmental interaction of winter wheat: A comparison of bioadditive factorial regression to AMMI. *Crop Sci.*, 43 : 608-617.
 49. Brancourt-Hulmel, M., G. Doussinault, C. Lecomte, P. Berard, V. Le Buanec, M. Trotte. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.*, 43: 37–45.
 50. Brancourt-Hulmel, M., E. Heumez, P. Pluchard, D. Beghin, C. Depatureaux, A. Giraud, J. Le Gouis. 2005. Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-input levels. *Crop Sci.* 45:1427–1431.
 51. Calderini, D.F., Savin, R., Abeledo, L.G., Reynolds, M.P., Slafer, G.A. 2001. The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica*, 119: 199-204.

52. Ceccarelli S. 1996. Positive interpretation of genotype by environment interaction in relation to sustainability and biodiversity. In: Plant Adaptation and Crop Improvement, 467-486. Cooper M. & Hammer G.L. (Ed.), CABI, Wallingford, UK.
53. Ceccarelli S., S. Grando and A. Impiglia. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environment. *Euphytica*, 103: 307-318.
54. Ceccarelli S., S. Grando, R.H. Booth, 2006. International breeding programmes and resource-poor farmers: crop improvement in difficult environments. The International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.
55. Ceccarelli S., Grando S., Maatougui M. 2010. Plant breeding and climate change. *Journal of agriculture science*, 148: 1-11.
56. Chennafi H., A. Aidaoui, H. Bouzerzour, A. Saci. 2006. Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci.*, 5: 854-860.
57. Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A., Chenafi A. 2008c. Positionnement des exigences en eau de la culture du blé dur avec l'avènement du déficit climatique en milieu semi-aride des Hautes Plaines Sétitiennes (Algérie). In Proceedings of the 5th International Conference on Land Degradation. Valenzano, Bari (Italie), 18-22 septembre 2008, pp. 59-62.
58. Chennafi H., Saci A., Harkati N., Fellahi N., Hannachi A., Fellafi Z. 2011. Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous l'effet des façons culturales en environnement semi-aride. *Agriculture* N° 2 :42-51.
59. CIC. 2010. Conseil International des Céréales. In Marché du blé dur. Analyses et perspectives. Ed. FranceAgriMer.
60. CIC. 2011. Conseil International des Céréales. Marché des céréales. GMR 416. Octobre 2011.

61. Clarke J.M., Romagosa L., Jana S., Srivastava J.P., McCaig T.N. 1989. Relationship of excised-leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. *Canadian Journal of Plant Sciences*, 69: 1057–1081
62. Clarke J.M., R.M. De Pauw, T.F. Townley-Smith. 1991. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci.*, 32: 723-728.
63. Clarke, John M., Ronald M. DePauw, Grant I. McLeod and Thomas N. McCaig. 1994. Variation for preharvest sprouting resistance in durum wheat. *Crop Science* 34(6):1632-1635.
64. Cooper, M., Fox, P. N., 1996. Environmental characterization based on probe and reference genotypes. In: Cooper, M.& Hammer, G.L. (Eds). *Plant adaptation and crop improvement*, CAB, International in association with IRRI & ICRISAT, Wallingford, pp 529-547.
65. Cossani, C.M., Savin, R., Slafer, G.A., 2007. Contrasting performance of barley and wheat in a wide range of conditions in Mediterranean Catalonia (Spain). *Ann. Appl. Biol.* 151, 167–173.
66. Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Res.* 112, 205–213.
67. Cox, T.S., Shroyer, R.J., Ben-Hui, L., Sears, R.G., Martin, T.J. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Sci.* 28, 756–760.
68. Crispeels M.J. 1994. Introduction to signal transduction in plants: A collection of updates, Am. Soc. *Plant Physiologists*, Rockville, MD
69. Cropstat 7.2.3. 2008. Software package for windows, *International Rice Research Institute*, IRRI, Manila.
70. Dakheel A.J., I. Nadji, V. Mahalakshmi, J.M. Peacock. 1993. Morphological traits associated with adaptation of durum wheat to harsh Mediterranean environments. *Aspects of Applied Biology*, 34: 297-307.

71. De Vita P., Di Paolo E., Fecondo G., Di Fonzo N., Pisante M. 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 92: 69-78.
72. Debaeke P., Cabelguenne M., Casals M.L., Puech J. 1996. Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epiephase-Bl. Elsevier / INRA. *Agronomie: agriculture and environment*, 16: 25-46.
73. Dehghani H., Ebadi A., Yousefi A. 2006. Biplot analysis of genotype by environment interaction for Barley yield in Iran. *Agron. J.*, 98: 388-393.
74. Garcia del Moral, B., Garcia del Moral, L.F., 1995. Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Res.* 44, 85–93
75. Demotes-Mainard, S., Jeuffroy, M.H., Robin, S., 1999. Spike dry matter and nitrogen accumulation before anthesis in wheat as affected by nitrogen fertilizer: relationship to kernels per spike. *Field Crops Res.* 64, 249–259.
76. Donaldson, E., Schillinger, F.W., dofin, S.M. 2001. Straw production and grain yield relationships in winter wheat. *Crop Science*, v.41, p.100-106.
77. Donmez, E., Sears, R.G., Shroyer, J.P., Paulsen, G.M., 2001. Genetic gain in yield attributes of winter wheat in the Great Plains. *Crop Sci.* 41: 1412–1419
78. Draper, N.R., H. Smith, Jr. 1966. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, New York.
79. Ducellier L. 1930 Espèces et variétés de céréales cultivées en Algérie. In: Les céréales d'Algérie. Alger
80. Duggan, B.L., Fowler, D.B., 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. *Crop Sci.* 46, 1479–1487.
81. Eberhart, S.A., and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36–40.

82. Ehdaie B., Alloush G.A., Madore M.A., Waines J.G. 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in Wheat: I. Post anthesis changes in internode dry matter. *Crop Sci*, 46: 735–746.
83. El Milidi S., Zivy M. 1993. Variabilité génétique des protéines de choc thermique et thermo-tolérance chez le blé. In : Le progrès génétique passe-t-il par le repérage et l'inventaire des gènes. Edition AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Pp173-181.
84. Erchidi A.E., Benbella M., Talouizte A. 2000. Relation entre certains paramètres contrôlant les pertes en eau et le rendement en grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. *Options méditerranéennes. Série A (Séminaires méditerranéens)*. 40 : 279 - 282.
85. Evans, L.T., Fischer, R.A., 1999. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Sci*. 39, 1544-1551.
86. Faostat. (1990. 2007. 2010) Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations: www.faostat.fao.org.
87. Feil, B. 1992. Breeding progress in small grain cereals: a comparison of old and modern cultivars. *Plant Breeding*, 108 (1): 1-11.
88. Feldman, M., Lupton, F.G.H., Miller, T.E. 1995. Wheats. In J. Smartt, N.W. Simmonds: *Evolution of crop plants*. Longman Group Ltd., London, 184-192
89. 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.
90. Féliachi, K., 2002. PNDA, Intensification et développement des filières. Cas de la céréaliculture. Acte des 3emes Journées Scientifique sur le blé, 12 et 13 /02/02. Université Mentouri, Constantine.
91. Fellahi, Z., Hannachi, A., Bouzerzour, H., Boutekrabt, A. 2013. Correlation between Traits and Path Analysis Coefficient for Grain Yield and Other

- Quantitative Traits in Bread Wheat under Semi-Arid Conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability* 3: 16-26.
92. Finaly, K.W., Wilkinson, G.N., 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.*, 14: 742-754.
93. Fischer, R.A., Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 29: 897-912.
94. Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105, 447-461.
95. Fischer, R.A., Stockman, Y.M., 1986. Increased kernel number in Norin 10 derived dwarf wheat: evaluation of the cause. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13: 767-784
96. Fischer, R.A., 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: a reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Res.* 105, 15-21
97. Fletcher Rj. 1983. Breeding for frost resistance in early flowering wheat. In Proc. 6th Inter. Wheat genetics sympo. 965-969.
98. Fokar, M., Nguyen, H.T., Blum, A. 1998. Heat tolerance in spring wheat. Grain filling. *Euphytica* 104: 9-15.
99. Ford CW, Wilson JR .1984. Changes in levels of solutes during osmotic adjustment to water stress in leaves of four tropical pasture species. *J. Plant Physiol*, 8: 79-91.
100. Foulkes M.J., Snape J.W., Shearman V.J., Reynolds M.P., Gaju O., Sylvester-Bradley R. 2007. Genetic progress in yield potential in wheat: recent advances and future prospects. *Journal of Agricultural Science*, 145:17-29.
101. Francia, E., A. Tondelli, F. Rizza, F.W. Badeck, O.L.D. Nicosia, T. Akare, S. Grando, A. AlYassin, A. Benbelkacem, W.T.B. Thomas, F.V. Eeuwijk, I. Romagosa, A.M. Stanca and N. Pecchioni, 2011. Determinants of barley grain yield in a wide range of Mediterranean environments. *Field Crops Research*, 120: 169- 178

102. Fukushima, A., Kusuda, O., Furuhashi, M. 2001. Spike development of winter-type wheat Iwainodaichi sown early in the southwestern part of Japan. *Jpn. J. Crop Sci.* 70: 499-504.
103. Gaff D.F. 1980. Protoplasmic tolerance of extreme water stress. In: Turner NC, Kramer PJ ; eds. *Adaptation of plants four water and high temperature stress*. Wiley, NY, 207.230.
104. Garcia del Moral, L.F., Ramos, J.M., Garcia del Moral, M.B., Jimenez-Tejada, P., 1991. Ontogenic approach to grain production in spring barley based on path-coefficient analysis. *Crop Sci.* 31: 1179–1185.
105. Gate P., Bouthier A., Woznica K. et Manzo M.E. 1990. La tolérance des variétés de blé tendre d'hiver à la sécheresse: premiers résultats I.T.C.F. *Perspectives agricoles*, 145: 17-23.
106. Gate, P., 1995. Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture. Ed. *Tec & Doc., Lavoisier Cachan*. 432p.
107. Gauch, H.G., Zobel R.W. 1996. AMMI analysis of yield trials. p.85-122. In: M.S. Kang and H. G. Gauch. (Ed.). *Genotype by environment interaction*. Boca raton. C.R.C. Press., Fl. 416p.
108. Gauch H.G., Zobel R.W. 1988. Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theor Appl Genet* 76:1-10.
109. Gebeyhou G., Knott D.R., Baker R.J. 1982. Relationships among duration of vegetative and grain filling phases, yield components and grain yield in durum wheat cultivars. *Crop Sci.*, 22: 287-290.
110. Georgieva K. 1999. Some mechanisms of damage and acclimation of the photosynthetic apparatus due to high temperature. *Bulg J Plant Physiol*, 25: 89-100.
111. Gibson, L.R., Paulsen, G.M., 1999. Yield components of wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. *Crop Sci.* 39: 1841-1846.

112. 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 Research* 33: 399-409
113. Glaz, B., Kang, M.S., 2008. Location contributions determined via GGE biplot analysis of multienvironment sugarcane genotype-performance trials. *Crop Sci.* 48: 941–950.
114. Gonzalez, F.G., Slafer, G.A., Miralles, D.J. 2005c. Photoperiod during stem elongation in wheat: is its impact on fertile floret and grain number determination similar to that of radiation? *Functional Plant Biology*, 32: 181-188.
115. Gorman D.P, Kang M.S, Milam M.R. 1989. Contribution of weather variables to genotype x environment interaction in grain sorghum. *Plant Breed* 103: 299-303
116. Gregory P.J. 1989. The role of roots characteristics in moderating the effects of drought. In: Drought resistance in cereals. (Eds.) Baker F.W.G. pp 141-150.
117. Grignac P. 1965. Contribution à l'étude du *Triticum durum*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. pp. 246.
118. Hachemi I. 1979. Le blé dur en Algérie. 5th Cereal workshop on the gap between present farm yield and the potential. Algiers, May 5-9, pp: 45-48.
119. Haddad L. 2010. Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, Département Agronomie, Faculté des Sciences, UFAS, 70 pp.
120. Hamblin J., Stefanova K., Angessa T.T. 2014. Variation in Chlorophyll Content per Unit Leaf Area in Spring Wheat and Implications for Selection in Segregating Material. *PLoS ONE* 9(3) e92529.
121. Hamid Z.A, Grafius J.E. 1978. Developmental allometry and its application to grain yield in barley. *Crop Sci.* 18: 83-86

122. Hammer, K.A., Carson, C.F., Riley, T.V. 1996 Susceptibility of transient and commensal skin flora to the essential oil of *Melaleuca alternifolia* (tea tree oil). *American Journal of Infection Control*, 24: 186-189.
123. Hammer Ø., D.A.T. Harper, P.D. Ryan. 2001. PAST (Palaeontological Statistics).
124. Hanson, D. K., Miller, D. H. Mahler. H. Ft., Alexander, N. J. and Perlman, P. S. 1979. *J. Biol. Chem.*, 254: 2480-2490.
125. Harlan, JR. 1975. Crops and man. ASA and CSSA, Eds. *Madison, Wisconsin*, 325 pages.
126. Hassan I.A. 2006. Effects of water stress and high temperature on gas exchange and chlorophyll fluorescence in *Triticum aestivum* L. *Photosynthetica*, 44:312–5.
127. Hauchinal, R.R., J.P. Tandon, P.M. Salinath. 1993. Variation and adaptation of wheat varieties to heat tolerance in Peninsular India. In Sanders, D. A. and G. P. Hettel. Wheat in heat stressed environments, irrigated dry areas and rice- wheat farming systems, Mexico, DF, *Cimmyt*, 175-183.
128. Hays D.B., Do J.H., Mason R.E., Morgan G., Finlayson S.A. 2007. Heat stress induced ethylene production in developing wheat grains induces kernel abortion and increased maturation in a susceptible cultivar. *Plant Sci.*, 172:1113–23.
129. Hazmoune T. 2000. Erosion des variétés de blé dur cultivées en Algérie : perspectives. In Royo C. (ed.). Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges. *Options Méditerranéennes, Série A*. 40: 291- 294.
130. He, Z.H., Xia, X.C., Chen, X.M., Zhuang, Q.S., 2011. Progress of wheat breeding in China and the future perspective. *Acta Agron. Sin.* 37: 202–215.
131. Henry Y., De Buyser J. 2000. L'origine des blés. *Pour la Science*, Hors-série n°26, pp 60-62.
132. Hervieu, B., R.Capone, S. Abis. 2006. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. *Ciheam analytical note*, N°9, 14pp.

133. Heun, M., ShŠfer-Pregl, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borhi, B., Salamini, F. 1997. Site of Einkorn wheat domestication identified by DNA finger printing. *Science*, 278: 1312-1314.
134. <http://tutiempo.com>. Consulté le: 01/07/2009.
135. IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 938 pp.
136. Irfaq, M., T. Muhammad, M. Amin and A. Jabbar. 2005. Performance of yield and other agronomic characters of four wheat genotypes under heat stress. *International Journal of Botany*, 1(2): 124-127.
137. Jackson, P., McRae, T., Hogarth, M., 1995. Selection of sugarcane families across variable environments II. Patterns of response and association with environmental factors. *Field Crops Research*. 43, 119-130.
138. Jenner, C.F., 1991. Effects of exposure of wheat ears to high temperature on dry matter accumulation and carbohydrate metabolism in the grain of two cultivars. II. Carry-over effects. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18:179-190.
139. Johnson, B. L., Dhaliwal, H.S. 1976. Reproductive isolation of *Triticum boeolkum* and *T. urartu* and the origin of the tetraploid wheats. – *Am. J. Bol.*, 63: 1088–1094.
140. Johnson D.A., Richards R A., Turner N.C 1983. *Crop Sci.*, 23,318.
141. Joppa L.R. 1987. Aneuploid analysis in tetraploid wheat. In E.G. Heyne, ed. Wheat and wheat improvement, p. 255-267. Madison, WI, USA, *American Society of Agronomy*.
142. Jordan W.R., P.J. Shouse, A. Blum, F.R. Miller, R.L. Monk. 1984. Environmental physiology of sorghum. II. Epicuticular wax load and cuticular transpiration. *Crop Sci.*, 24: 1168–1173.

143. Kadi Z., F. Adjel, H. Bouzerzour. 2010. Analysis of the genotype x environment interaction of barley grain yield (*Hordeum vulgare* L.) under semi-arid conditions. *Advances in environmental biology*, 4 (1) : 34-40.
144. Kang, B.T., van der Kruijs, A.C.B.M., Cooper, D.C. 1989. Alley cropping for food production in the humid and subhumid tropics. In: Kang, B.T., and Reynolds, L. (eds.), *Alley Farming in the Humid and Subhumid Tropics*, pp. 16-26. *International Development Research Centre*, Ottawa, Canada.
145. Kang, M.S., Gorman, D.P. 1989. Genotype x environment interaction in maize. *Agron. J.*, 81: 662-664.
146. Kang, M.S., V.D. Aggarwal, R.M. Chirwa. 2006. Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield-stability statistic and GGE biplot analysis. *J. Crop Improv.*, 15: 97-120.
147. Karam, F., Kabalan, R., Breidi, J., Rouphael, Y., Oweis, T., 2009. Yield and water production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes. *Agric. Water Manage*, 96: 603-615.
148. 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 Audecoop. Ce Master est le numéro 93 de la série Master of Science de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. Master of Science du CIHEAM – IAMM, n° 93. 160p.
149. Kirby e.J.M. 1985. Significant stages of ear development in winter wheat. In: Day W., Atkin R.K. (Ed.). *Wheat Growth and Modeling*. *Plenum press*. New York, pp 7-24.
150. Kirby, E.J.M. 1988. Analysis of leaf stems and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis. *Field Crop Res.*, 18: 127-140.

151. Kribaa M., Hallaire S., Curmi J., 2001. Effects of tillage methods on soil hydraulic conductivity and durum wheat grain in semi-arid area. *Soil and tillage*, 37 : 17-28.
152. Kueh J.S.H., Hill J.M., Smith S.J., Bright S.W.J. 1984 Proline biosynthesis in a proline-accumulating barley mutant. *Phytochemistry*, 23: 2207–2210.
153. Lacaze, X., Roumet, P. 2004. Environment characterisation for the interpretation of environmental effect and genotype \times environment interaction. *Theor Appl Genet.* 109: 1632–1640.
154. Lahmar R., Bouzerzour H. 2010. Du mulch terreux au mulch organique. Revisiter le dry-farming pour assurer une transition vers l'agriculture durable dans les Hautes Plaines Sétifiennes. Actes des IVièmes RMSD, Setif, 3-5 mai 2010. *Recherches Agronomiques*, INRAA N° spécial 48-58.
155. Landau S., RAC. Mitchell, V. Barnett, J.J. Colls, J. Craigon, R.W. Payne. 2000. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101: 151–166
156. Larbi A., Mekliche, A., Abed, R., Badis, M., 1998. Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) en région semi-aride. (INSID).
157. Latiri K., Lhomme, J.P. Annabi, M., Setter T.L. 2010. Wheat production in Tunisia: Progress, inter-annual variability and relation to rainfall. *Eur. Journal Agronomy*, 33:33-42.
158. Lauer J.G., S.R. Simmons. 1989. Canopy light and tiller mortality in spring barley. *Crop Sci.*, 29: 420-424.
159. Laumont P., J. Erroux. 1961. Inventaires des blés durs rencontrés et cultivés en Algérie. *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 5 : 96.
160. Lecomte C. 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype – milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse

- présentée devant L'institut national agronomique Paris-Grignon pour obtenir le titre de Docteur de l'INAPG. Préparée à l'Unité de Recherches sur la Génétique et l'Ecophysiologie des Légumineuses à Graines (URLEG) de l'INRA de Dijon. 173 p.
161. Leigh, A.A., 1993. The impact of polyploidy on grass genome evolution. *Plant Physiol.* 120: 587-593.
162. Lin C.S., Binns, M.R., Lefkovitch L.P., 1986. Stability analysis: Where do we stand? *Crop Sci.*, 26: 894-900.
163. Lin C.S., M.R. Binns. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can. J. Plant Sci.*, 68:193–198.
164. Lobell, D. B. , J. Ivan Ortiz-Monasterio, Gregory P. Asner, Pamela A. Matson, Rosamond L. Naylor, Walter P. Falcon. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crop. Res.* 94: 250–256.
165. Lobell D. B., Sibley A., J. Ivan Ortiz-Monasterio. 2012. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change*, 2: 186–189.
166. MADR. 2011. Annuaire statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Série B.
167. Magari R., Kang M.S. 1993. Genotype selection via anew yield-stability statistic in maize yield trials. *Euphytica*, 70: 105-111.
168. Mamma D., E. Kourtoglou, P. Christakopoulos. 2008. Fungal multienzyme production on industrial by products of the citrus-processing industry. *Bioresour. Technol.*, 99: 2373-2383.
169. McIntosh M. S. 1983. Analysis of combined experiments. *Agronomy Journal*, 75: 153–155.
170. Mckey J. 1968. Species relations in Triticum. Proc.2nd *International Wheat Genetic symposium*, Hereditas, 2: 237-276.

171. Mekhlouf A., H. Bouzerzour. 2000. Déterminisme génétique et associations entre le rendement et quelques caractères à variation continue chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Recherche Agronomique*, INRAA. 7 : 37- 49.
172. 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*, Vol 17, Num 4 : 507-13
173. Menad A. Meziani, N. Bouzerzour, H., Benmahammed, A. 2011. Analyse de l'interaction génotype x milieux du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.): application des modèles AMMI et la régression conjointe. *Nature & Technolgie* n° 05: 99-106.
174. Meynard J.M., David G. 1992. Diagnostic sur l'élaboration du rendement des cultures. *Cahiers Agriculture*, 1: 9-19.
175. Meziani, N., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Menad, A. Benbelkacem. 2011. Performance and adaptation of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to diverse locations. *Advance in Environmental Biology*, 5:1465-1472.
176. Miller W.G. 2012. Openstat. Free statistical software written.
177. Miralles D.J., Slafer, G.A., 1999. Wheat development. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Product Press, New York, USA, pp. 13–43.
178. Miralles D.J., Richards, R.A., Slafer, G.A., 2000. Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27 (10): 931-940.
179. Miralles D.J., Slafer, G.A., 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *J. Agric. Sci.*, 145: 139–149.
180. Mishra S. P., Mohapatra P.K. 1987. Soluble carbohydrates and floret fertility in wheat in relation to population density stress. *Annals of Botany*, 60: 269-277.

181. Modarresi M., V. Mohammadi, A. Zali, M. Mard. 2010. Response of wheat yield and yield related traits of high temperature. *Cereal Research communications*, 38(1) pp. 23-31.
182. Mohammadi M., R. Karimizadeh. 2012. Insight into heat tolerance and grain yield improvement in wheat in warm rainfed regions of Iran. *Crop Breeding Journal* 2(1): 1-8.
183. Monneveux P., M. Nemmar. 1986. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6: 583-590.
184. Morgan J.M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35: 299-319.
185. Morgan J. M. 1991. A gene controlling differences in osmoregulation in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18: 249-257.
186. Mouret J.C., A.P. Conesa, A. Bouchier, M. Gaid. 1990. Identification des facteurs de variabilité des rendements du blé en conditions hydriques limitantes dans la région de SBA. In proc. International Seminar on the physiology and breeding of winter cereals for stressed Mediterranean environments. Eds Acevedo, E., A.P. Conesa, P. Monnayeur et J.P. Srivastava, *Les Colloques INRAE*, 64:35-48.
187. Nemmar M. 1980. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf) 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.
188. Nouar H., L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Zerargui, A. Benmahammed, H. Bouzerzour. 2010. Performances comparées des variétés de blé dur: Mohammed Ben Bachir, Waha et Boussalam dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture*, 54: 23-29.

189. Nouar H., H. Bouzerzour, L. Haddad, A. Menad, T. Hazmoune, H. Zerargui. 2012. Genotype x environment interaction assessment in durum wheat (*Triticum durum* Desf) using AMMI and GGE models. *Advances in Environmental Biology*, 6: 3007-3015.
190. Ortiz-Monasterio J.I., S.S. Dhillon, R.A. Fischer. 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.
191. 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.
192. Ortiz-Monasterio J.I.R., KD. Sayre, S. Rajaram, M. McMahon. 1997. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Sci.*, 37: 898–904.
193. Oscarson P. 2000. The strategy of the wheat plant in acclimating growth and gain production to nitrogen availability. *J. Exp. Bot.* 51: 1921-1929.
194. Oweis T., H. Zhang, M. Pala. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.*, 92: 231–238.
195. Passioura J.B. 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management*, (7): 265-80.
196. Perry M. W., M.F. D'Antuono. 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. *Aust. J. Agr. Res.* 40: 457–472.
197. Pfeiffer WH. 1993. Drought tolerance in bread wheat. Analysis of yield improvement over years in Cimmyt germplasm. In: Klatt, eds. *Proceedings of the International Conference on Wheat Production Constraints in Tropical Environments*.

- Mexico (DF): Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT).
198. Pfeiffer W.H., K.D. Sayre, M.P. Reynolds. 2000. Enhancing genetic grain yield potential and yield stability in durum wheat. *Options méditerranéennes* .40: 83-93p.
199. Power J.F., Alessi.J. 1978. Tiller development and yield of standard and semidwarf spring wheat varieties as affected by nitrogen fertilizer. *J. Agric. Sci.* 90: 97-108.
200. Purchase J.L., H. Hatting, C.S. Van Deventer. 2000. Genotype x environment interaction of winter wheat in south Africa: Stability analysis of yield performance. *S. Afr. J. Plant Soil*, 17: 101-107.
201. Queme J.L., J. Crossa, H. Orozco, M. Melgar. 2007. Analysis of genotype-by-environment interaction for sugarcane using the sites regression model (SREG). *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 26: 764-769.
202. Radmehr M. 1997. Effect of heat stress on physiology of growth and development of wheat. Ferdowsi University. Mashhad, Iran. 201 pp
203. Ramburan S., M. Van Den Berg. 2011. Review and analysis of post-release variety evaluation of sugarcane: A South African perspective. *International Sugar Journal* 113, 444-452.
204. Randall P.J., H. J. Moss. 1990. Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research*. 41: 603-617.
205. Rasmussen C. W.A. Payne, R.S.W. Smiley., M.A. Stolz. 2003. Yield and water-use efficiency of eighth wheat cultivars planted on seven dates in North-Eastern Oregon. *Agron. J.*, 95: 836- 843.
206. Rebetzke G.J, Richards R.A., Fettell N.A., Long M., Condon A.G., Forrester R.I, Botwright T.L. 2007. Genotypic increases in coleoptile length improves stand establishment, vigour and grain yield of deep-sown wheat. *Field Crops Research*, 100: 10-2.

207. Refay Y.A. 2011. Yield and yield component parameters of bread wheat genotypes as affected by sowing dates. *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 7 (4): 484-489.
208. Rejeb M.N., M. Ben Salem. 1993. Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 22: 49-52.
209. Reynolds M.P., M. Balota, M.I.B. Delgado, I. Amani, R.A. Fisher. 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21:717-730.
210. Reynolds M.P., Rajaram, S., Sayre, V., 1999. Physiological and genetic changes of irrigated wheat in the post-green revolution period and approaches for meeting projected global demand. *Crop Sci.*, 39:1611-1621
211. Reynolds M., Foulkes J., Furbank R. Griffiths S., King J., Murchie E., Parry M., Slafer G. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell and Environment*, 35: 1799-1823.
212. Richards R.A. 1987. Physiology and the breeding of wintergrown cereals for dry areas. In: Srivastava J, Porceddu E, Acevedo E and Barma S (eds) Drought Tolerance in Winter Wheats. *Chichester, England: Wiley*, pp 133-149.
213. Richards R.A., Reitzke G.J., Van Herwaarden A.F., Duggan B.L., Condon A. 1997. Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture*, 36: 254-66.
214. Ristic Z., Bukovnik U., Momcilovic I., Fu J., Prasad P.V.V. 2008. Heat-induced accumulation of chloroplast protein synthesis elongation factor, EF-Tu, in winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 165: 192-202.
215. Robertson, A. L., J. Lancaster, A. G. Hildrew. 1995. Stream hydraulics and the distribution of microcrustacea: A role for refugia? *Freshw. Biol.*, 33: 469-484.

216. Romay, C.N., Malvar, R.A., Campo, L., Alvarez, A., Moreno-Gonzalez, J., Ordas, A., Revilla, P. 2010. Climatic and genotypic effects for grain yield in maize under stress conditions. *Crop Science*. 50: 51-58.
217. Royo, C., Michelena, A., Carrillo, J.M., Garcí'a, P., Juan-Aracil, J., Soler, C., 1998. Spanish durum wheat breeding program. In: Nachit, M.M., Baum, M., Porceddu, E., Monneveux, P., Picard, E. (Eds.), SEWANA (South Europe, West Asia and North Africa) Durum Research Network. *Proceedings of the SEWANA Durum Network Workshop, Syria*, pp. 80–87.
218. Royo, C., Abaza, M., Blanco, R., Garcí'a del Moral, L.F. 2000. Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 27, 1051–1059.
219. Royo, C., Álvaro, F., Martos, V., Ramdani, A., Isidro, J., Villegas, D., García del Moral, L.F., 2007. Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica*, 155:259–270.
220. Samonte S. O. P. B., Wilson L. T., Tabien R. E., McClung A. M. 2008. Use of gross income as a measure of productivity in rice breeding. *Can J Plant Sci*, 88(5): 1015–1022.
221. Savin, R., Slafer, G.A., 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *J. Agric. Sci.*, 116: 1–7.
222. Sayre K.D., Acevedo E., Austin R.B. 1995. Carbon isotope discrimination and grain yield for three bread wheat germplasm groups grown at different levels of water stress. *Field Crops Research*, 41: 45–54
223. Scandalios, J.G. 1990. Response of plant antioxidant defense genes to environmental stress. *Adv. Genet.*, 28:1-41.

224. Semenov M.A., Halford N.G. 2009. Identifying target traits and molecular mechanisms for wheat breeding under a changing climate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2791–2804.
225. Serrago, R.A., Miralles, D.J., Slafer, G.A. 2008. Floret fertility in wheat as affected by photoperiod during stem elongation and removal of spikelets at booting. *Eur. J. Agron.*, 28: 301–308.
226. Sharma K. Pandey K. Dubey K. 2010. Exploitation of phosphate solubization potential of certain species of *penicillium* for agriculture. *Biosci. Biotechnol. Rec. Commun.* 2: 209-210.
227. Sharma. R.C., Smith E.L. 1986. Selection for high and low harvest index in three winter populations. *Crop Science*. 26: 1147- 1150.
228. Shearman, V., Sylvester-Bradley, R., Scott, R.K., Foulkes, M.J. 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Sci.* 45: 175–185.
229. Sial, M.A., M.A. Arain, S.D. Khanzada, M.H. Naqvi, M.U. Dahot , N.A. Nizamani. 2005. Yield and quality parameters of wheat genotypes as affected by sowing dates and high temperature stress. *Pak. J. Bot.*, 37(3): 575-584.
230. Siddique, K.H.M., E.J.M. Kirby, M.W. Perry. 1989. Ear:stem ratio in old and modern wheat varieties: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.*, 21: 59-78
231. Simane, B., J.M. Peacock, P.C. Struik. 1993. Differences in development and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Plant Soil*, 157: 155-166.
232. Simmonds N.W. 1991. Selection for local adaptation in a plant breeding programme. *Theor. Appl. Genet.*, 82: 363-367.

233. Sinebo, W. 2005. Trade of between yield increase and yield stability in three decades of barley breeding in a tropical high land environment. *Field Crop Res.*, 92: 35-52.
234. Slafer, G.A., Abeledo, L.G., Miralles, D.J. 2001. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. *Euphytica*, 119 (1/2), 191-197.
235. Slafer, G.A., Andrade, F. H. 1990. Genetic improvement effect on pre-anthesis phonological attributes related to wheat grain yield. *Field Crop research*, 23: 255-263.
236. 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.
237. Slafer, G.A., Satorre, E.H., Andrade, F.H. 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Slafer, G.A. (Ed.), *Genetic Improvement of Field Crops*. Marcel Dekker, New York, p 1-68.
238. 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. Tunis.
239. Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., Zid, B. 2005. Les céréales en Tunisie: production, effet de la sécheresse et mécanisme de résistance. *Sécheresse*. 16(3):225-9.
240. Smith J.D., 1990. The use of parent-offspring regression as an estimate of heritability. *Crop Sci.* 5:595–596.
241. Spielmeyer W., Richards R.A. 2004. Comparative mapping of wheat chromosome 1AS which contains the *tiller inhibition* gene (*tin*) with rice chromosome 5S. *Theor. Appl. Genet.*, 109: 1303–1310.
242. Steel R.G.D., J.H. Torrie. 1982. Principles and Procedures of Statistics. 3rd Edn., McGraw-Hill International Book Co., London.

243. Stone P.J., M E. Nicolas. 1994. Wheat cultivars vary widely in their responses of grain yield and quality to short periods of post-anthesis heat stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21: 887–900.
244. Stone P.J., M.E. Nicolas. 1995. A survey of the effects of high temperature during grain filling on yield and quality of 75 wheat cultivars. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46: 475-492.
245. Takahashi T., Nakaseko, K. 1992. Varietal difference in yield response to delayed sowing dates in spring wheat of Hokkaido. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 22-27.
246. Talukder, H., G.Gill, G. McDonald, P. Hayman, B. Alexander. 2010. Field evaluation of sensitivity of wheat to high temperature stress near flowering and early grain set. Food Security from Sustainable Agriculture: *Proceedings of the 15th Australian Agronomy Conference*, Lincoln, New Zealand, 15-18 November 2010. Hugh Dove and Richard Culvenor (eds.)
247. Tashiro T., Wardlaw I.F. 1989. A comparison of the effects of high temperature on the grain development in wheat and rice. *Annals of Botany*, 64: 59-65.
248. Tewolde, H., K.R. Sistani, D.E. Rowe, A. Adeli, J.R. Johnson. 2007. Lint yield and fiber quality of cotton fertilized with broiler litter. *Agron. J.*, 99:184 194.
249. Turner N.C. 1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. In: Mussell H and Staples RC (eds) *Stress Physiology in Crop Plants*. New York/London: Wiley Inter science, pp 343–372.
250. Turner N.C. 1986 Adaptation to water deficits: A changing perspective. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13: 175– 190.
251. Tyagi PK, Pannu RK, Sharma KD, Chaudhary BD, and Singh DP (2003). Response of different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars to terminal heat stress. *Tests of Agrochem and Cultivars*, 24: 20-21.
252. Tyree MT. Jarvis PG. 1982. Water in tissues and cells. In : Lange DL, Nobel PS. Osmond CB, Ziegler H, eds. *Encyclopedia of plant physiology*. New Series, Vol.

- 128 Physiological plant ecology II., Water relations and carbon assimilation. Springer- erlag, Berlin : 36.77.
253. Van Eeuwijk, F.A., Elgersma, A., 1993. Incorporating environmental information in an analysis of genotype by environment interaction for seed yield in perennial ryegrass. *Heredity* 70, 447-457.
254. Van Eeuwijk, F.A., Keizer, L.C.P., Bakker, J.J. 1995. Linear and bilinear models for the analysis of multienvironment trials: II. An application to data from the Dutch Maize Variety Trials. *Euphytica* 84: 9-22.
255. Van Herwaarden A.F., Richards R.A., Farquhar GD., Angus J.F .1998. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. III. The influence of wheat deficit and heat shock. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49: 1095-1110.
256. Van Oosterom, E.J., Bidinger, F.R., Mahalakshmi, V., Rao, K.P. 1996. Effect of water availability pattern on yield of pearl millet in semi-arid tropical environments. *Euphytica* 89, 165-173.
257. Vargas, M., Crossa, J., Sayre, K., Reynolds, M., Ramirez, M.E., Talbot, M., 1998. Interpreting genotype x environment interaction in wheat by partial least squares regression. *Crop Science* 38, 679-689.
258. Voltas, J., Romagosa, I., Lafarga, A. 1999. Genotype by environment interaction for grain yield and carbon isotope discrimination of barley in Mediterranean Spain. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50 (7): 1263-1271.
259. Voltas, J., López-Córcoles, H., Borrás, G., 2005. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. *Eur. J. Agron.*, 22: 309–324
260. Wahid. A, Gelania S., Ashraf M., Foolad M.R. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61: 199–223.

261. Wang, X., J. Cai, D. Jiang, F. Liu, T. Dai and W. Cao, 2011. Pre-anthesis high-temperature acclimation alleviates damage to the flag leaf caused by post anthesis heat stress in wheat. *J. Plant Physiol.*, 168: 585–593.
262. Wardlaw I. F., Moncur L. 1995. The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22: 391-397.
263. Wardlaw IF., J. Willembrik. 1994. Carbohydrate storage and mobilisation by the culm of wheat between heading and grain maturity: The relation of sucrose synthase and sucrose phosphate synthase. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21: 255-271.
264. Wollenweber B., Porter J.R., Schellberg J. 2003. Lack of interaction between extreme high temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science.*, 189: 142–150.
265. Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng, Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597-605.
266. Yan, W. 2001. GGE-biplot – a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of twoway data. *Agron. J.* 93: 1111–1118
267. Yan, W. and L.A. Hunt, 2001. Interpretation of genotype x environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Sci.*, 41: 19-25.
268. Yan, W., Cornelius, P.L., Crossa, J., Hunt, L.A., 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Sci.*, 41: 656–663.
269. Yan, W., L.A. Hunt. 2001. Interpretation of genotype x environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Sci.* 41: 19-25
270. Yan, W., Hunt, L. A. 2002. Biplot analysis of diallel data. *Crop Sci.* 42: 21–30
271. Yan, W. and Rajcan, I. 2002. Biplot evaluation of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci.* 42: 11–20.
272. Yan, W. 2002. Singular value partitioning for biplot analysis of multi-environment trial data. *Agron J.* 94: 990–996

273. Yan, W., Kang, M. S. 2003. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL.
274. Yan, W., Tinker, N. A. 2005. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype-by-environment interactions. *Crop Sci.* 45: 1004–1016.
275. Yan, W. et Tinker, N. A. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Can. J. Plant Sci.* 86: 623–645.
276. Yang J.C., Zhang J.H. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*. 169, 223-236.
277. Yang, R., Crossa J., Cornelius, P.L., Burgueno, J. 2009. Biplot analysis of genotype x environment interaction: Proceed with caution. *Crop Science*, 49:1564-1576.
278. Yau S.K., J. Hamblin. 1994. Relative yield as a measure of entry performance in variable environments. *Crop sci.*, 34:813-817.
279. You, L., C. Ringler, G. Nelson, U. Wood-Sichra, R. Robertson. S. Wood, G. Zhe, T. Zhu, Y. Sun. 2009. Torrents and trickles: Irrigation spending needs in Africa. Background Paper 9, African Infrastructure Country Diagnostic. Washington, D.C.: World Bank Group.
280. Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weeds Research*, 14: 415-421.
281. Zaghouane O., Abdellaoui Z., Houassine D. 2006. Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes. Troisième rencontre méditerranéennes de semis direct, Zaragoza, ED. *Opt. méditerran*, série A, n° :69, p: 185.
282. Zamani A.S., Nasser A. 2008. Response of dryland wheat production and precipitation water productivity to planting date. *Asian J. of Plant Sci.*, 7: 323-326.
283. Zhang, J., Nguyen, H.T., Blum, A. 1999. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *J. Exp. Bot.*, 50: 291-302.

284. Zhuang, Q.S. 2003. Chinese Wheat Improvement and Pedigree Analysis. *China Agricultural Press*, Beijing, China (in Chinese).
285. Zhou, M., Joshi, S., Maritz, T., Koberstein, H., 2011. Components of genotype by environment interaction among SASRI regional breeding and selection programmes and their implications. *Proceedings of the South African Sugar Technologists Association* 84, 363-374.
286. Zobel, R. W., M. J. Wright, H. G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.*, 80: 388-393.
287. Zohary, D., Hopf, M. 1993. Domestication of plants in the Old World. *Clarendon Press*, Oxford.

This is a refereed journal and all articles are professionally screened and reviewed

ORIGINAL ARTICLE

Genotype xEnvironment Interaction Assessment in Durum Wheat (*Triticum durum*Desf) using AMMI and GGE Models**¹Hind Nouar, ²Hamenna Bouzerzour, ¹LeilaHaddad, ³Abdelkader Menad, ⁴Tahar Hazmoune, and ⁵Hocine Zerargui**¹Agronomy Department, Ferhat Abbas University, Setif, Algeria²Ecology and Plant Biology Department, Faculty of Life and Natural Sciences, Ferhat Abbas University, Setif, Algeria.³Biology Department, Tahar Moulay University, Saida, Algeria.⁴Agronomy Department, University of Skikda, Algeria⁵Field Crop Institute, Agricultural Research Station, Setif, Algeria.Hind Nouar, Hamenna Bouzerzour, LeilaHaddad, Abdelkader Menad, Tahar Hazmoune and Hocine Zerargui; Genotype xEnvironment Interaction Assessment in Durum Wheat (*Triticum durum*Desf) using AMMI and GGE Models**ABSTRACT**

Development of varieties with high yield potential coupled with wide adaptability is an important plant breeding objective. The presence of genotype by environment interaction plays a crucial role in determining the performance of genetic materials, tested at different locations and in different years. This study was undertaken to assess yield performance, stability and adaptability of twelve durum wheat genotypes evaluated over five environments. There was highly significant genotype-environment interaction. The use of the additive model as well as the joint regression proved to be inefficient in the interpretation of results compared to AMMI analysis of variance which explained 90.80% of the sum of square of the interaction. This analysis indicated that cultivar Waha exhibited a wide adaptation across all test-sites, while the GGE biplot analysis indicated that the five test-locations represented 3 sub-regions where Mrb₃, Boussalem and Badre were the winners. Selection for specific adaptation allowed 10.51% genetic gain over selection for large adaptation. Grain yield stability was approached using the genotypic superiority index, the across locations variance, the AMMI stability variance and the genotypes rank on both mean and stability, using the GGE biplot analysis. Rank correlation coefficients among stability parameters indicated their dissimilar. Pi index combines yield performance and stability classified Boussalem and Mrb₃ were high yielding and stable. Similar conclusion was reached using the genotype rank method of the GGE biplot analysis.

Key words: *Triticum durum*, adaptation, G x L interaction, stability, yield, AMMI, GGE.**Introduction**

In the Nord Africa and West Asia region, durum wheat grain yield is severely limited by biotic and abiotic stresses with a strong effect of rainfall amount and distribution pattern [8]. This resulted in grain yield variation, ranging from crop failure to 4.0 t ha⁻¹ at different sites, and cropping seasons [4, 13]. Low yields resulted from the combined effects of winter low temperatures, spring frost hazards, terminal high temperatures and water shortage [2, 20, 17]. Francia *et al.*, [14] noted that grain yield response to environmental changes was related to the allelic variation of the Vrn-H₁, Ppd-H₂ and Eam₆ genes which control growth habit. Even though genotype x environments interaction, when large enough, hinders selection progress, it can be properly

exploited through appropriate selection strategies [2]. In fact, the objective of durum wheat breeding program is to develop new cultivars showing either wide adaptation to overall growing area or specific adaptation to sub regions [2, 24]. The adaptation pattern of each tested cultivar is described by its response across a range of environments representative of the target production area [2, 17, 3, 21]. In this context the joint regression and the additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) models help understanding the magnitude of the interaction to be able to exploit it [12, 29, 11]. Yan *et al.*, [26] developed the GGE biplot analysis which combines the genotype (G) effect and the interaction (GE) to address the issue of cultivar recommendation in multi-location trials. The GGE biplot analysis identifies which genotype won in

Corresponding AuthorHind Nouar, Agronomy Department, Ferhat Abbas University, Setif, Algeria
E-mail: hbouzerzour50@gmail.com

which environments, facilitating sub-regions identification. Grain yield stability is a desirable characteristic when selecting genotypes for wide adaptation while reliability allows combining performance and stability into a unique index representing the genotype merit [1]. Several biometrical methods have been developed to assess stability [6]. The deviation from linear regression is widely adopted by breeders due to its simplicity, but it is unrelated to genotypic grain yield performances [13, 17]. AMMI stability value (ASV) statistic, based on the first two principal components scores, ranks the genotypes according to their yield stability [23]. The objective of this study was to assess the magnitude of the genotype x locations interaction for grain yield and to identify stable durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties within a set of twelve advanced breeding lines evaluated across five diverse locations during the 2009/2010 cropping season.

Materials and methods

Sites, genotypes and experimental design:

Field trials were carried out during the 2009-10 cropping season at five locations, namely Harrouch, Khroub, Setif, Sidi Bel Abbes and Saïda (Algeria, Table 1). The experiment was conducted under rainfed conditions. Twelve durum wheat genotypes were tested, including Algerian commercial varieties and advanced breeding lines from the national and Cimmyt-Icarda durum wheat breeding programs (Table 2). Plant material was sown in a randomised complete block design with four replications. Sowing was done in November with an experimental drill in plots 1.2 m wide x 5 m long, at a seeding rate of 300 seeds m⁻². Nutrient deficiencies were prevented with fertilization at sowing, by an application of 100 kg ha⁻¹ of super phosphate 46% and at jointing, by an application of 75 kg ha⁻¹ of urea 46%. Weeds were controlled chemically with GranStar [*Methyl Tribenuron*] at 12 g ha⁻¹ rate. Grain yield was determined by mechanical harvesting all 6 rows per plot. Accumulated rainfall during the course of the crop cycle at the five locations is given in Table 1.

Table 1: Characteristics of the experimental locations.

Ordre	Site name	Abrev.	Latitude (°)	longitude (°)	Altitude (m)	Rain(mm)
1	Harrouch	HA	37°09'N	8°67'E	132	674.0
2	Khroub	KH	36°55'N	6°65'E	640	520.0
3	Setif	SE	36°12'N	5°24'E	1081	417.0
4	Sidi Bel Abbes	SB	35°02'N	0°3'W	554	418.1
5	Saïda	SA	34°03'N	0°8'W	1013	467.8

Table 2: Pedigree of the durum wheat breeding lines and cultivars evaluated at the five experimental sites during the 2009/2010.

Genotype	Pedigree	Cross origin
Badre	Boussalem/Ofanto	ITGC (Setif)
Boussalem	Heider/Martes/Huevos de Oro	Cimmyt-Icarda
Essalem	Ofanto/*2Waha	ITGC- Setif
Gaviota durum	Crane/4/Polonicum ₁₈₅₃₀₉ /T. glutinosum enano/2*Teh ₆₀ /3/Grulla	Cimmyt-Icarda
Korifla	DS ₁₅ /Gieger	Cimmyt-Icarda
MBB	Genealogical selection from a landrace population	ITGC (Setif)
Mrb ₃	JoriC ₆₉ /Haurani	Cimmyt-Icarda
Mrb ₅	JoriC ₆₉ /Haurani	Cimmyt-Icarda
Ofanto	Appulo/Valnova	IAO (Italy)
Setifis	Ofanto/Waha/MBB	ITGC (Setif)
Vitron	Turkey ₇₇ /3/Jori/Anhinga/Flamingo	Cimmyt-Icarda
Waha	Pelicano/Ruffino/Gaviota/Rolette	Cimmyt-Icarda

Data analysis:

Single analysis of variance of grain yield was performed per site to test the genotypic effect. Homogeneity of the residuals was tested and was found not significant. The combined analysis of variance was, then, performed according to the following model:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + L_j + (G \times L)_{ij} + e_{ijk},$$

where Y_{ijk} is the yield of the i^{th} genotype in the j^{th} location and k^{th} block, μ is the grand mean, G_i is the main effect of the i^{th} genotype, L_j is the main effect of the j^{th} location, $(G \times L)_{ij}$ is the interaction term of the i^{th} genotype in the j^{th} location, and e_{ijk} is the error term [15].

To describe the genotype x locations interaction of grain yield and to identify stable genotypes, joint regression and additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analyses were performed on the $(G \times L)_{ij}$ term. The joint regression analysis was performed according to Finlay and Wilkinson [12] where the $(G \times L)_{ij}$ effect was partitioned into components $b_i L_j$ and d_{ij} , which accounted for the linear regression of the i^{th} genotype on the j^{th} location yield index and the deviation from regression, respectively. Slope value (b) was determined for each genotype, as well as the genotype contribution to the $G \times L$ interaction and deviation from regression. The $(G \times L)_{ij}$ effect was also partitioned according to the AMMI model proposed by Gauch [15] as:

$$(\mathbf{G} \times \mathbf{L})_{ij} = \sum \mathbf{u}_{ni} \mathbf{v}_{nj} + \mathbf{r}_{ij},$$

where \sum is the sum of the $n = 1, 2, \dots, n$ PC axes included in the model, \mathbf{u}_n is the eigenvector of the n^{th} PC axis, \mathbf{u}_{ni} is the scaled eigenvector of the i^{th} genotype for the n^{th} axis, \mathbf{v}_{nj} is the scaled eigenvector of the j^{th} location for the n^{th} axis, and \mathbf{r}_{ij} is the residual of the $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction. Analyses were performed with the *thcropstat* software 7.2.3 [9], using "cross-site analysis" subroutine which simultaneously gives the results of AMMI and the joint regression analyses. The deviation from regression and residual AMMI were tested against the pooled error, whereas the heterogeneity of the regression and the mean squared of CPI_1 and CPI_2 were tested against their respective residual. Location main effect was tested against replications nested within site (rep/S), and genotype main effect was tested against $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction mean square. $\text{G} \times \mathbf{L}$ interaction was tested against the pooled error [1]. The GGE-biplot software [26, www.ggebiplot.com] was used to generate graphs showing the "which-won-where" pattern, and to rank cultivars on the basis of yield and stability. Stability was also approached using the genotypic superiority index (Pi) proposed by Lin and Binns [19], the AMMI stability variance (ASV) proposed by Purchase *et al.*, [23] and the among sites variance proposed by Lin *et al.*, [18]. The Spearman rank correlation coefficients (r_s) between stability parameters were calculated with Past software package [16].

Results:

Grain yield performances within and between sites:

Development of durum wheat varieties with high yield potential coupled with wide adaptability is an important plant breeding objective. Grain yield analysis of variance, performed per site, indicating a significant genotype effect at each one of the five locations, suggesting the existence of potentially useful genetic variability among the twelve genotypes to be exploited through selection (Table 3). The average grain yield of individual site ranged from 1.23 to 4.71 t ha⁻¹, respectively at Harrouch (HA) and Khroub (KH) (Table 4). These values indicate the diversity of environments encountered by the durum wheat production in Algeria. The yield extremes expressed per the combination genotype \times site are more important, varying from 1.00 to 5.65 t ha⁻¹ (Table 4). Apart from the local check, the variety MBB (Mohammed Ben Bachir), which ranked the last at all sites, the other genotypes ranked among the best top yielding in at least one site. Boussalem and Mrb₃ ranked among the top yielding genotypes at four out of five sites, while Waha ranked among the top yielding at three sites (Table 4). The low grain yield performances of MBB at all the test-site indicated the genetic progress achieved by the

newly selected varieties as reported by Nouar *et al.*, [22]. The fact that each site identified a specific set of top yielding genotypes is suggestive of the presence of genotype \times locations interaction ($\mathbf{G} \times \mathbf{L}$) which was confirmed by the combined analysis of grain yield of all locations (Table 5). The location was the most important source of variation, accounting for 88.6% of the treatment sum of squares, while the $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction explained 8.0% of the total sum squares accounted for by location, genotype and genotype \times locations interaction (Table 5). The genotype effect was not significant, which contrasted with the conclusions of the single site analyses which indicated the presence of genotypic variability (Table 3).

In the presence of significant genotype \times sites interaction, the additive model of the analysis of variance suggested that each site must be treated separately due to its specificity. Generalizing the results, to more than one site, is not possible although it is of great interest to the breeder [27, 2, 17]. The use of joint regression to model the adaptive pattern of the different genotypes over the test sites, as suggested by Finlay and Wilkinson [12], was not efficient in the case of the present study, since the heterogeneity of regression term of the model was not significant (Table 5). All the regression coefficients, tested against their respective standard error, were significantly different from zero but not significantly different from unity (data not shown). Yau [28] mentioned that the joint regression analysis is an effective technique to study the genotype \times environments interaction only when the heterogeneity of regressions shows significance and explains a sizeable portion of the interaction sum square. The contribution to the interaction means squares ($\text{MS}_{\text{G} \times \text{E}}$) and the deviations from regression means squares (MS_{dev}), tested against the pooled error, were only significant for Badre and Setifis breeding lines (data not shown). These results corroborated the criticism made by Ebdon and Gauch [10] that the regression technique confuses interaction and main effects. Compared with the non-significant effect of the joint regression, the first two AMMI interaction principal components were significant and explained 90.80% of the $\mathbf{G} \times \mathbf{S}$ interaction sum square, leaving a non-significant residual of small magnitude (Table 5). Compared with the non-significant 17.90% of the $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction explained by the regression model, these results demonstrated the efficiency of the AMMI analysis, in extracting a large part of the $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction. Based on grain yield main effect, Mrb₃ and Essalem represented the highest and the lowest yielding genotypes across environments, respectively (Table 4). In the absence of cross over interaction, means across environments are good indicators of genotypic performance. When the $\mathbf{G} \times \mathbf{L}$ interaction is significant, distances from the origin are indicative of the amount of interaction that is

exhibited by either genotype over environments or environment over genotypes. KH, SA, and SE locations showed a highly interactive behavior, compared to SB location which exhibited low

interaction. The nearly additive behavior of SB location indicated that genotypic yields in that environment are correlated with the overall genotypic means across environments (Table 4, Figure 1).

Table 3: Mean square of single site analysis of variance of grain yield ($t\ ha^{-1}$).

Source	df	ST	KR	HR	SB	SD
Replication	03	0.145 ^{ns}	0.046 ^{ns}	0.085 ^{ns}	0.056 ^{ns}	0.043 ^{ns}
Genotype	11	1.450 ^{**}	1.463 ^{**}	0.108 ^{**}	0.417 ^{**}	0.571 ^{**}
Residual	33	0.246	0.078	0.023	0.047	0.168
Coefficient of variation (%)	--	13.9	6.1	12.5	9.1	11.0

ns, **: not significant and significant effects at 1%, respectively.

Table 4: Means grain yield of the twelve genotypes evaluated at five sites during the 2009/10 cropping season.

Genotype	SE	KH	HA	SB	SA	Yi.
Badre	2.80	5.65 ^a	1.00	2.60	4.11 ^a	3.23
Boussalem	4.37 ^a	5.01	1.47 ^a	2.71 ^a	3.68 ^a	3.45
Essalem	2.86	4.11	0.92	1.99	3.83 ^a	2.74
Gaviota durum	3.55	4.26	1.33 ^a	2.29	4.10 ^a	3.10
Korifla	3.97 ^a	5.13	1.23	2.31	3.33	3.19
MBB	3.94	3.90	1.18	2.24	3.44	2.94
Mrb ₃	4.61 ^a	4.98	1.32 ^a	2.97 ^a	3.78 ^a	3.53
Mrb ₅	3.19	4.11	1.28 ^a	2.43	4.11	3.02
Ofanto	2.84	4.15	1.37 ^a	2.06	3.42	2.77
Setifis	3.69	5.59 ^a	1.05	2.50	2.96	3.16
Vitron	3.22	4.53	1.37 ^a	1.95	4.16 ^a	3.05
Waha	3.82	5.04	1.25 ^a	2.78 ^a	3.76 ^a	3.33
Y _j	3.57	4.71	1.23	2.40	3.72	3.13
LSD5%	0.71	0.40	0.22	0.31	0.59	

a = top yielding genotypes, whose means are not significantly different at the 5% according to the LSD test. SE = Setif, KH = Khroub, HA = Harrouch, SB = Sidi Bel Abbes, SA = Saïda

Table 5: Joint regression and AMMI analysis of variance for genotype grain yield.

Source of variation	df	SS	MS	F _{obs}	test F	R ² (%)
Treatment	59	388.20	6.58	--	--	--
Site (S)	4	344.08	86.02	1146.93	**	88.6
Reps / S	15	1.13	0.075	0.68	ns	---
Genotype (G)	11	13.08	1.19	1.68	ns	3.36
G x S	44	31.04	0.71	6.45	**	8.0
Regression	11	5.56	0.50	0.64	ns	17.9
Deviations from regression	33	25.68	0.78	7.09	**	---
IPCA ₁	14	15.76	0.41	2.56	**	50.8
IPCA ₂	12	12.40	1.01	6.31	**	40.0
AMMI residual	18	2.88	0.16	1.45	ns	---
Pooled error	165	18.65	0.11			--

df = degrees of freedom, SS = sum of squares, MS = means square, R²(%) = % SS explained, IPCA₁, IPCA₂ = first and second principal components of the interaction

The IPCA score of a genotype is indicator of stability across environments. Greater IPCA scores, either negative or positive, indicate specific adaptation to environments near which the genotype is positioned on the biplot. Waha, an improved check variety, lay on the left-hand side, not far from the origin when compared with Badre, Setifis, Mrb₃, MBB, Mrb₅ and Vitron which represented the vertices genotypes that exhibited larger interactions. From their relative position, Badre, Essalem, Vitron, Ofanto, Mrb₅, Gaviota and MBB are grouped together, which suggests that these genotypes exhibited similar adaptive patterns to HA and SA locations. On the opposite side of the IPCA₁ axis, Setifis, Korifla, Boussalem and Mrb₃ formed a second group with similar adaptive patterns to KH and SE locations, while Waha behaved as a stable cultivar across the five locations, due to its position near the origin (Figure 1). A rough linear relationship

between interaction scores and main effects for genotypes appeared in the AMMI biplot, indicating that genotypes characterized by extreme main effects (belonging to first and second groups) had opposite interaction scores. The former had positive interaction scores while the second had negative scores; consequently, they are adapted to different environments. A further examination of the AMMI₂ biplot reveals that the second multiplicative term distinguished between genotypes adapted to each location. These results indicated that breeders had the choice to select Waha due to its large adaptation and above average grain yield against the alternative to recommend this genotype to the sub region represented by SB location and to select Setifis specifically for KH location, Mrb₃ for SE, Mrb₅ for SA and Gaviota for HA location. The expected grain yield improvement offered by this alternative and estimated as: $Y_i + Y_j - Y_{..}$ (genotype IPCA₁ x

location IPCA₁ scores)[29], provided a genetic gain of 10.51% (Figure 1, Table 6). The polygon view of the GGE biplot indicated that the five location-tests were representative of three durum wheat growing sub-regions (Figure 2). Badre was the winner in the sub-region represented by SA and KH locations; Mr₃ was the winner in the sub-region represented by SE and SB locations while Boussalem was the winner in the sub-region represented by HA. Ofantolying on the vertex did not respond at any of the locations (Figure 2).

Stability of performances across locations:

The search for a high yield potential is interesting in the case where performances are linked to stability in space and time. The index of genotypic superiority Pi is a measure of both of these characteristics [6]. Low values of this index are indicative of both high performance and stability. In the present study, values of this index were negatively correlated with the yield main effects, suggesting that genotypes with low Pi values

performed well at all sites and were the most stable. Both Boussalem and Mrb₃ and to a lesser extend Waha meet these requirements (Figure 3, Tables 7 and 8). Ofanto had high Pi value and low marginal grain yield, this genotype had also the lowest across sites variance of 1.20 compared to Badre which exhibited the highest across sites variance of 3.04 (Table 7). The across sites variance was positively correlated with the marginal yields of the different genotypes, suggesting that stable genotypes were the least performing (Tables 7 and 8). The AMMI stability value (ASV) indicated that MBB and Ofanto were stable, this stability parameter showed no relationship with genotypic performances (Tables 7, 8). This clearly indicated that genotypes found to be stable on the basis of one method are not necessarily stable on the basis of another method. The rank of the genotypes on the basis of yield and stability, using GGE biplot analysis, indicated that Mrb₃ was stable and high yielding followed by Boussalem and Waha. Badre was the least stable (Figure 4).

Table 6: Yields and yield gains expected from selection for wide adaptation and specific adaptation.

Site	Genotype	Grain yield	index	Genotype	Yield	index
	Wide Adaptation			Specific Adaptation		
HA	Waha	3.26		Gaviota	3.25	
KH	Waha	3.46		Setifis	4.13	
SA	Waha	3.14		Mrb ₅	3.55	
SB	Waha	3.35		Waha	3.35	
SE	Waha	3.44		Mrb ₃	4.12	
	Mean	3.33	100.00	Mean	3.68	110.51%

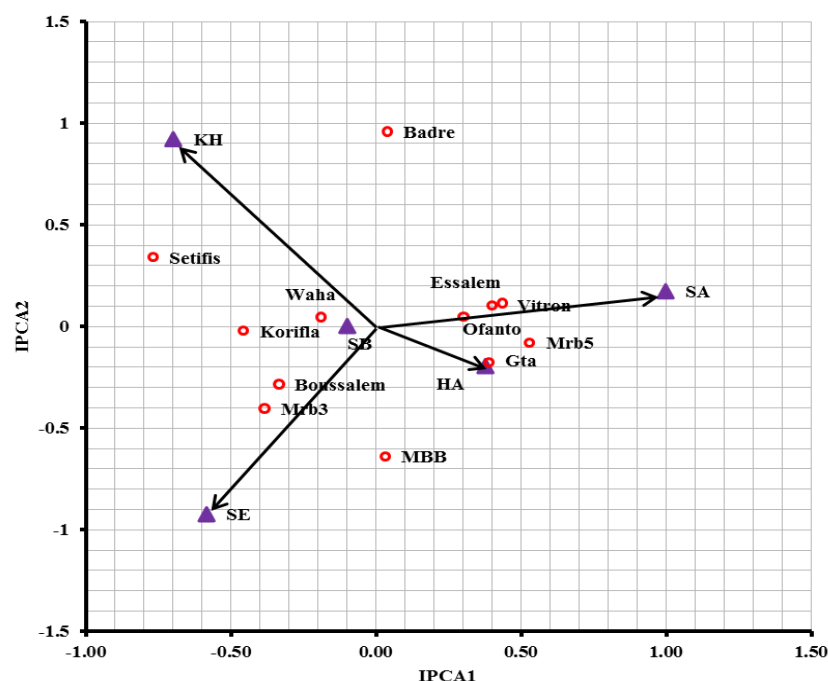


Fig. 1: Biplot of the AMMI analysis for grain yield of the twelve genotypes evaluated at five sites (HA = Harrouch, KH = Khroub, SA = Saïda, SB= Sidi Bel Abbes, SE = Setif).

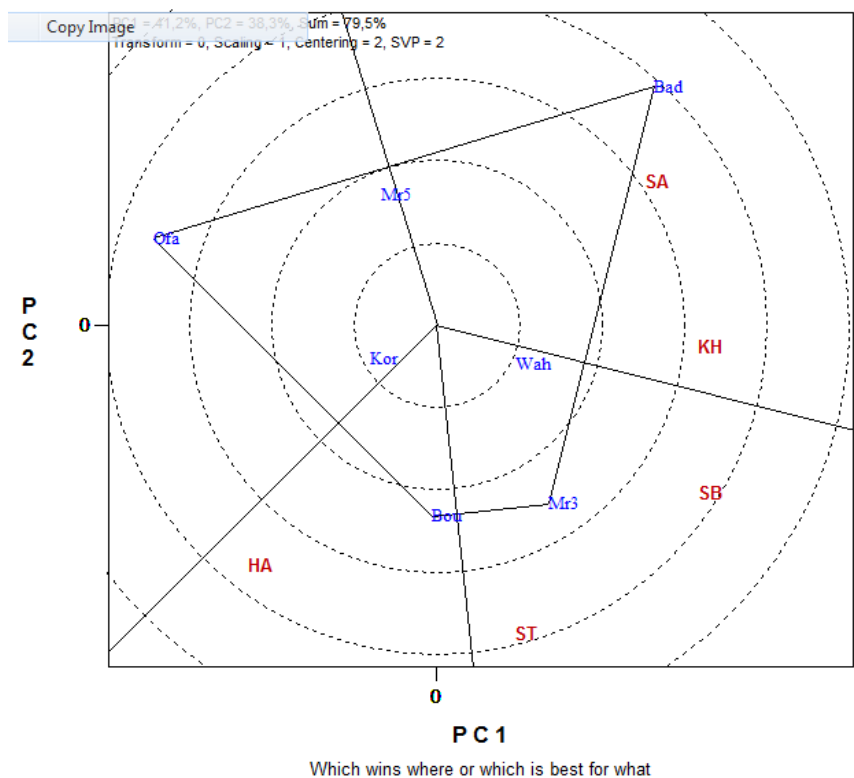


Fig. 2: Polygon view of the GGE biplot indicating which won-where and the three sub-regions represented by the five location-tests.

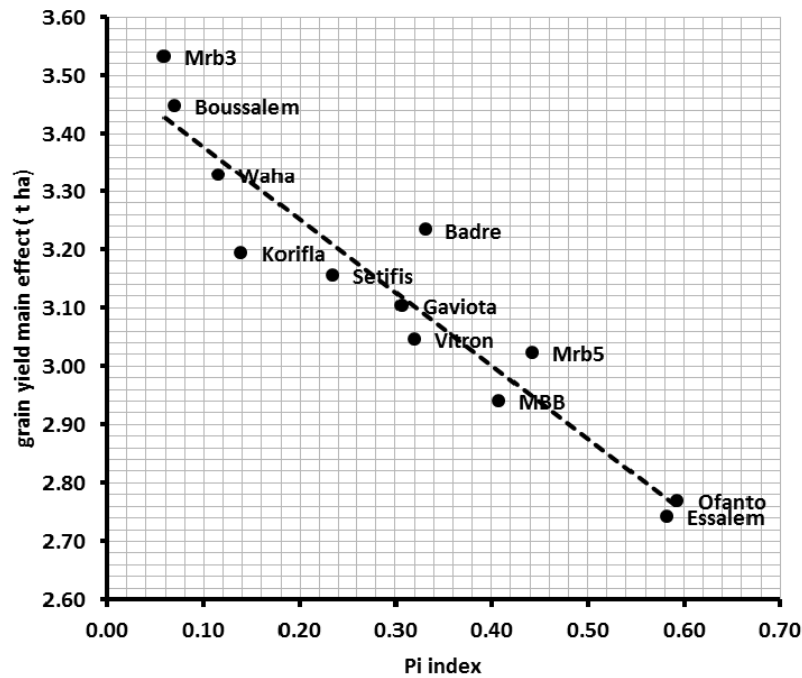


Fig. 3: Relation between the Pi values and genotypic grain yield main effect.

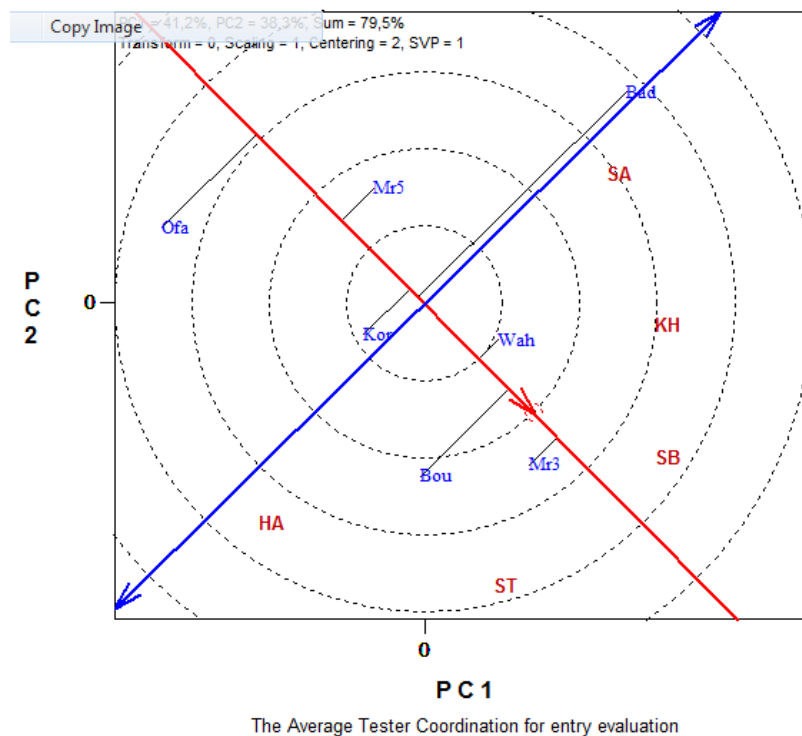


Fig. 4: Ranking durum wheat genotypes on both mean and stability

Table 7: Index values of the superiority genotypic variance between sites and AMMI stability of 12 genotypes.

Genotype	Pi	σ^2_j	ASV	Genotype	Pi	σ^2_j	ASV
Badre	0.331	3.04	0.96	Mrb ₃	0.06	2.13	0.63
Boussalem	0.069	1.96	0.51	Mrb ₅	0.442	1.45	0.67
Essalem	0.582	1.74	0.56	Ofanto	0.593	1.20	0.39
Gaviota	0.307	1.58	0.52	Setifis	0.235	2.77	1.04
Korifle	0.139	2.26	0.58	Vitron	0.319	1.87	0.56
MBB	0.407	1.44	0.64	Waha	0.115	2.00	0.25

Table 8: Spearman correlation coefficients (r_s) between the different traits measuring the stability and yield main effect (Y_i) of the 12 genotypes evaluated at 5 sites.

Parameters	Y_i	Pi	σ^2_i	ASV
Y_i		0.0000	0.0092	0.9828
Pi	-0.9171		0.0332	0.7617
σ^2_i	0.7133	-0.6154		0.2207
ASV	-0.0070	0.0981	0.3818	0

Coefficient values are below the diagonal and their corresponding probabilities are above diagonal

Discussion:

Multi-location trials provide useful information on genotypic performances and stability. Durum wheat yield and agronomic traits varied considerably as a result of genotype, environment and their interaction [5]. The genotype x environments interaction estimates help plant breeders to decide to breed for specific or general adaptation. Selection of varieties with wide adaptation is desirable, but it is difficult to achieve in the presence of cross over interaction [7, 2, 17]. To overcome this difficulty, breeders select for specific adaptation to use more efficiently the specificity of the different growing sub-regions [25, 2, 6]. The results of this study confirmed the presence of the interaction of grain yield which varied from 1.00 to 5.65 t ha⁻¹ depending

on site and genotype. This wide variation reflected the diversity of environments encountered by durum wheat cultivation in Algeria. Site effect absorbed 88.6% of the treatment sum of squares leaving only 8.0% for the interaction. These results corroborate those of Kadi *et al.*, [17] for barley. Joint regression modeling of genotype response to the different sites was inefficient while the first two AMMI principal components explain 90.80% of the interaction sum square. Four locations out of five were an important source of interaction. Waha exhibited a wide adaptation to all sites while the remaining lines exhibited a specific adaptation to the different test sites. Selection for specific adaptation provided a genetic gain of 10.51% compared to selection for wide adaptation. Among the three stability indices used, only the Pi index showed that Boussalem and

Mrb₃ were high performing and stable. The across sites variance suggested that Ofanto was stable and low performing. The AMMI stability variance was not associated to yield performance, and indicated that MBB and Ofanto were the most stable.

Conclusions:

The results of this study show that, under semiarid conditions of the 2009/2010 growth season, durum wheat grain yield varied across locations and genotypes. The AMMI analysis provided a better description and explained a large part of the G x S interaction than joint regression analysis. AMMI analysis clearly discriminated between genotypes with wide adaptation and those showing a specific adaptation. The selection for specific adaptation results in a genetic gain of 10.51%. Among the stability parameters studied Pi index and the genotype rank method of the GGE biplot analysis indicated that both Mrb₃ and Boussalem combined high yield performance and stability.

References

- Annicchiarico, P., 2002. Genotype x Environment interactions: Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. FAO Plant Production and Protection Paper No. 174. FAO, Rome, 115.
- Annicchiarico, P.F., F. Bellah and T. Chiari, 2006. Repeatable genotype x location interaction and its exploitation by conventional and GIS-based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Eur. J. Agronomy*, 24: 7081.
- Annicchiarico, P., L. Pecetti, H. Bouzerzour, R. Kallida, A. Khedim, C. Porqueddu, N.M. Simões, F. Volaire and F. Lelièvre, 2011. Adaptation of contrasting cocksfoot plant types to agricultural environments across the Mediterranean basin. *Environ. Exp. Bot.*, 74: 82-89.
- Bahlouli, F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed and K.L. Hassous, 2005. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semiarid conditions. *Pak. J. Agro.*, 4: 360-365.
- Basford, K.E. and M. Cooper, 1998. Genotype x environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Austr. J. Agric. Res.*, 49: 153-174.
- Benmahammed, A., M. Kribaa, H. Bouzerzour and A. Djekoun, 2010. Assessment of stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semiarid conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Euphytica*, 172: 383-394.
- Brancourt-Hulmel, M. and C. Lecomte, 2003. Effect of environmental variates on genotype x environment interaction of winter wheat: A comparison of Biadditive Factorial Regression to AMMI. *Crop Sci.*, 43: 608-617.
- Chennafi, H., A. Aidaoui, H. Bouzerzour and A. Saci, 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.
- Cropstat 7.2. 3., 2008. Free Statistics Package by IRRI, Manila, Philippines.
- Ebdon, J.S. and H.G. Gauch, 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: I. Interpretation of genotype x environment interaction. *Crop Sci.*, 42: 489-496.
- Fan, X.M., M.S. Kang, H.M. Chen, Y. Zhang, J. Tan and C. Xu, 2007. Yield Stability of Maize Hybrids Evaluated in Multi-Environment Trials in Yunnan, China. *Agron. J.*, 99: 220-228.
- Finlay, K.W. and G.N. Wilkinson, 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.*, 14: 742-754.
- Francia, E., F. Rizza, L. Cattivelli, A.M. Stanca, G. Galiba, B. Toth, P.M. Hayes, J.S. Skinner and N. Pecchioni, 2005. Two loci on chromosome 5H determine low temperature tolerance in a 'Nure' (winter) x 'Tremois' (spring) barley map. *Theor. Appl. Genet.*, 108: 670-680.
- Francia, E., A. Tondelli, F. Rizza, F.W. Badeck, O.L.D. Nicosia, T. Akare, S. Grando, A. Al-Yassin, A. Benbelkacem, W.T.B. Thomas, F.V. Eeuwijk, I. Romagosa, A.M. Stanca and N. Pecchioni, 2011. Determinants of barley grain yield in a wide range of Mediterranean environments. *Field Crops Research* 120: 169-178.
- Gauch, H.G., 1992. Statistical Analysis of Regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs. Elsevier, Amsterdam, 278.
- Hammer, O., D.A.T. Harper and P.D. Ryan, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4: 1-9.
- Kadi, Z., F. Adjel and H. Bouzerzour, 2010. Analysis of the genotype x environment interaction of Barley grain yield (*Hordeum vulgare* L.) under semiarid conditions. *Advance in Environmental Biology*, 4: 34-40.
- Lin, C.S., M.R. Binns and L.P. Lefkovitch, 1986. Stability analysis: Where do we stand? *Crop sci.*, 26: 894-900.
- Lin, C.S. and M.R. Binns, 1988. Genetic properties of four stability parameters. *Theor. Appl. Genet.*, 82: 205-209.
- Mekhlouf, A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. HadjSahraoui and N. Harkati, 2006. Adaptation des variétés de blé dur

- (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Sécheresse, 4: 507-513.
21. Meziani, N., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Menad, A. Benbelkacem, 2011. Performance and adaptation of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to diverse locations. Advance in Environmental Biology, 5: 1465-1472.
 22. Nouar, H., L. Haddad, Z. Laala, L. Oulmi, H. Zerargui, A. Benmahammed and H. Bouzerzour, 2010. Performances comparées des variétés de blé dur Mohammed Ben Bachir, Waha et Boussalem dans la wilaya de Sétif. Céréaliculture, 54: 23-28.
 23. Purchase, J.L., H. Hatting and C.S. Van Deventer, 2000. Genotype x environment interaction of winter wheat in south Africa: Stability analysis of yield performance. S. Afr. J. Plant Soil, 17: 101-107.
 24. Rane, J., R.K. Pannu, V.S. Sohu, R.S. Saini, B. Mishra, J. Shoran, J. Crossa, M. Vargas and A.K. Joshi, 2007. Performance of yield and stability of advanced wheat genotypes under heat stress environments of the Indo-Gange plains. Crop Sci., 47: 1561-1573.
 25. Sinebo, W., 2005. Trade of between yield increase and yield stability in three decades of barley breeding in a tropical high land environment. Field Crop Res., 92: 35-52.
 26. Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavics, 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop sci., 40: 597-605.
 27. Yan, W. and L.A. Hunt, 2001. Interpretation of genotype x environment interaction for winter wheat yield in Ontario. Crop Sci., 41: 19-25.
 28. Yau, S.K. and J. Hamblin, 1994. Relative yield as a measure of entry performance in variable environments. Crop. Sci., 34: 813-817.
 29. Zobel, R.W., M.J. Wright and H.G. Gauch, 1988. Statistical analysis of a yield trial. Agron. J., 80: 388-393.



Performances comparées des variétés de blé dur : Mohammed Ben Bachir, Waha et Bousselam dans la wilaya de Sétif

H. Nouar¹, L. Haddad¹, Z. Laala¹, A. Oulmi¹, H. Zerargui², A. Benmahammed¹, H. Bouzerzour^{1*}

(1) LVRBN, Université Ferhat Abbès, Sétif - Algérie

(2) ITGC - Institut technique des grandes cultures - Ferme de démonstration et de production de semences de Sétif - Algérie

*bouzerzourh@yahoo.fr

RESUME

La présente étude a été conduite au cours de sept campagnes agricoles sur le site expérimental de l'ITGC de Sétif. L'objectif est de comparer les performances des variétés MBB, Waha et Bousselam. Les résultats montrent l'avantage des variétés Waha et Bousselam comparativement à MBB. En années difficiles, ces deux variétés réussissent à faire des rendements équivalents à ceux de MBB. En années favorables, elles expriment des performances plus élevées, contrairement à MBB qui valorise moins le milieu. Le gain de rendement moyen est de 16.6% du rendement moyen de MBB pour Waha et 24.5% pour Bousselam.

Mots clés : *Triticum durum*, performance, gain de rendement, interaction.

SUMMARY

The present study was conducted during a seven-year period at the ITGC experimental site of Sétif. The objective was to compare the yield performances of the durum varieties MBB, Waha and Bousselam. The results showed the advantage of Waha and Bousselam over MBB. During the harsh years these two varieties were able to achieve grain yields similar to those realised by MBB. Under favourable growing conditions these two genotypes expressed higher yields, as compared to MBB. Waha presented a mean genetic gain of 16.6% and Bousselam showed an average of 24.5% of MBB grain yield.

ملخص

أجريت هذه الدراسة خلال سبعة مواسم زراعية على مستوى الموقع التجريبي التابع لمحةطة المعهد التقني للمحاصيل الواسعة بسطيف. الهدف هو المقارنة بين قدرات أصناف محمد بن بشير، واحة و بوسلام. تبين النتائج ميزة صنف واحة و بوسلام مقارنة بمحمد بن بشير. في السنوات المجهدة، هذان الصنفان قادرين على تقديم مردود يعادل مردود صنف محمد بن بشير. أما في السنوات غير المجهدة، فتبدي قدرات أعلى، على عكس صنف محمد بن بشير.

جاءت الزيادة في متوسط المردود بـ 16.6% لواجهة و 24.5% لبوسلام من متوسط مردود محمد بن بشير.



INTRODUCTION

Mohammed Ben Bachir (MBB) est une variété historique pour la céréaliculture de la région de Sétif. Cette variété est une sélection des services de la recherche agronomique datant de 1950, sélection faite à l'intérieur d'une population locale de la région de Ain Roua (Nord de Sétif), et multipliée à la station annexe de Ouled Hamla (Laumont et Erroux, 1961). Cette variété a occupé, occupe et occupera probablement, encore, une grande partie de la sole réservée au blé dur dans la wilaya de Sétif. L'attachement à cette variété, exprimé par les agriculteurs, reste un grand mystère, même pour les plus initiés de la céréaliculture de la région. En effet, plusieurs études montrent les faibles performances de MBB, suite à sa longue durée de la phase végétative, qui lui fait subir les effets des stress de fin de cycle (Mekhlouf *et al.*, 2006), sa mauvaise répartition de la matière sèche produite entre le grain et la biomasse aérienne accumulée (Bahlouli *et al.*, 2005), et sa faible valorisation des apports d'eau de complément (Chenafi *et al.*, 2006).

Conscient que la variété est le moyen le plus rapide et le moins cher pour augmenter significativement les rendements, dès le début des années 1970, les services de la recherche agronomique introduisaient massivement du matériel végétal, en provenance d'institutions internationales, dont CIM-MYT et ICARDA, dans l'espoir de sélectionner des variétés plus performantes (Benmahammed *et al.*, 2001). Plusieurs variétés performantes ont été identifiées, parmi lesquelles Waha (Plc/Ruff/Gta/Rtte) qui a connu une large adop-

tion par la grande culture, occupant une superficie de plus en plus importante sur les 70000 ha réservés à la culture de blé dur à Sétif. Plus récemment, une nouvelle variété de blé dur vient de connaître un début d'adoption dans les régions de Tiaret et de Sétif, il s'agit de Bousselam (Heider/Martes/Huevos de Oro), une sélection de l'ITGC de Sétif. Selon Annicchiarico *et al.* (2005), cette nouvelle variété occupait un classement honorable dans les essais multi-sites. L'objet de la présente contribution est d'analyser le comportement de ces trois variétés et d'estimer le gain génétique apporté par l'adoption de Waha et de Bousselam relativement à MBB, dans la wilaya de Sétif.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les trois variétés concernées par l'étude : MBB, Waha et Bousselam, ont été évaluées au cours des campagnes agricoles 2000/01 - 2005/06 et en 2008/09 sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif (Belkherchouche *et al.*, 2009 ; Bouzerzour *et al.*, 2008 ; Haddad, 2009). Les génotypes sont mis en place dans un dispositif en blocs avec trois répétitions sur des parcelles élémentaires de 6 m² (5 m de long x 1.2 de

large). Les techniques culturales appliquées sont identiques à celles décrites par Belkherchouche *et al.* (2009). Les notations portent essentiellement sur la détermination de la date d'épiaison, la hauteur du chaume, le rendement en grains et les composantes du rendement : nombre d'épis m², poids de 1000 grains et nombre de grains par épi. Les données obtenues ont été soumises à une analyse de la variance à deux facteurs étudiés : années et génotypes et un facteur contrôlé : les blocs, en utilisant les logiciels Cropstat 7.2 (2007) et Openstat (2009).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la variance montre un effet milieu hautement significatif pour l'ensemble des caractères mesurés, suggérant que les différences entre campagnes sont de loin les plus importantes en valeurs comparativement aux différences entre génotypes (tableau 1). Ainsi, la moyenne des rendements, des trois génotypes, varie selon les campagnes de 162.3 à 369.4 g m². Cette variation a pour origine une interaction complexe des conditions climatiques, vu que le rendement montre peu de liaison avec le cumul pluviométrique de septembre à juin ($r = 0.039^{ns}$). A cet effet,

Tableau 1. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée des variables mesurées au cours des 7 campagnes agricoles sur les trois génotypes.

Source	ddl	RDT	NGM ²	PMG	HT	NGE	NE	PREC
Env	6	55401**	522056**	118**	382**	279**	23036**	226**
Rep/Env	14	223 ^{ns}	20833 ^{ns}	2.08 ^{ns}	3.81 ^{ns}	1.8 ^{ns}	211 ^{ns}	4.17**
Gen	2	21010 ^{ns}	16241 ^{ns}	1.12 ^{ns}	1874**	87.3 ^{ns}	626 ^{ns}	479.3**
GenxEnv	12	9733**	823711**	8.85**	103.4**	25.0**	5629**	8.9*
Erreur	18	230.7	38981	4.01	9.00	3.6	249.4	3.9

Env = environnement, Gen = génotype, Rep/Env = blocs hiérarchisés dans les environnements, RDT = rendement grain (g m²), NGM² = nombre de grains m², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m², PREC = durée de la phase végétative (du 1 janvier à l'épiaison, en jours) ; ns, *, ** = effet non significatif et significatif au seuil de 5 et 1% respectivement.



Oudina et Bouzerzour (1993) rapportent des effets significatifs de l'interaction entre la pluie et la température moyenne des mois de décembre, janvier et février sur la variabilité du rendement de l'orge Tichedrett, au cours de la période 1949/50 à 1985/86.

En effet, avec un cumul de 215.9 mm, la campagne 2001/02 fait un rendement équivalent de celui de la campagne 2002/03 qui a enregistré le cumul le plus élevé de 521.8 mm. Et inversement pour des cumuls pluviométriques assez proches, les campagnes 2003/04 (453.3 mm) et 2005/06 (416.3 mm) réalisent des rendements très différents (figure 1). Cette variation inter campagnes est notée pour les composantes du rendement, la hau-

teur du chaume et à un degré moindre pour la durée de la phase végétative (tableau 2). L'effet campagne ajoute donc du souci aux producteurs de blé dur de la wilaya de Sétif et il appartient au sélectionneur de trouver le moyen comment minimiser cet effet, en identifiant des génotypes plus plastiques (Simane *et al.*, 1993 ; Richards *et al.*, 2002).

Parmi les 7 campagnes, 5 réalisent des rendements supérieurs à 300 g m⁻², et 2 des rendements inférieurs à 200 g m⁻². Ces différences de rendement s'accompagnent par des différences significatives des nombres de grains m⁻² et par épi (tableau 2, figure 1). En effet, le rendement par campagne est significativement corrélé avec ces deux

composantes qui sont aussi liées entre elles ($r_{RDT_NGM^2} = 0.971^{**}$, $r_{RDT_NGE} = 0.847^{**}$ et $r_{NGM^2_NGE} = 0.801^{**}$). Ces résultats suggèrent que les conditions climatiques mises en cause dans la baisse du rendement en grains sont celles affectant le nombre de grains par épi et par conséquent le nombre de grains m⁻².

L'analyse de la variance montre une interaction génotype x campagne hautement significative, ce qui engendre un effet génotype, le plus souvent, non significatif, sauf pour la hauteur et la durée de la phase végétative (tableau 1). En effet, malgré l'interaction, l'effet moyen génotype indique que Waha est la plus courte de chaume, Bousselam a une taille intermédiaire mais

Tableau 2. Effet moyen milieu (campagne) des variables mesurées.

Millieu	RDT	NGM ²	PMG	HT	NGE	NE	PREC
2000/01	294.1	8471.1	34.8	65.5	20.0	422.2	119.7
2001/02	337.1	9699.3	34.8	69.7	27.9	351.4	120.1
2002/03	339.4	9962.4	33.7	69.7	21.8	450.5	127.5
2003/04	369.4	9413.5	39.8	71.1	19.9	472.7	120.8
2004/05	162.3	4355.0	37.5	60.3	11.1	393.9	122.3
2005/06	195.3	4432.7	44.2	62.8	13.3	333.1	123.9
2008/09	312.1	8310.7	37.6	98.5	19.8	421.2	133.6
Moy.Gén.	287.1	7806.4	37.5	71.1	19.1	406.4	123.9
Ppds 5%	15.1	461.5	1.5	2.9	1.4	14.7	2.1

NGM² = nombre de grains m², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m², PREC = durée de la phase végétative (du 1 janvier à l'épiaison, en jours).

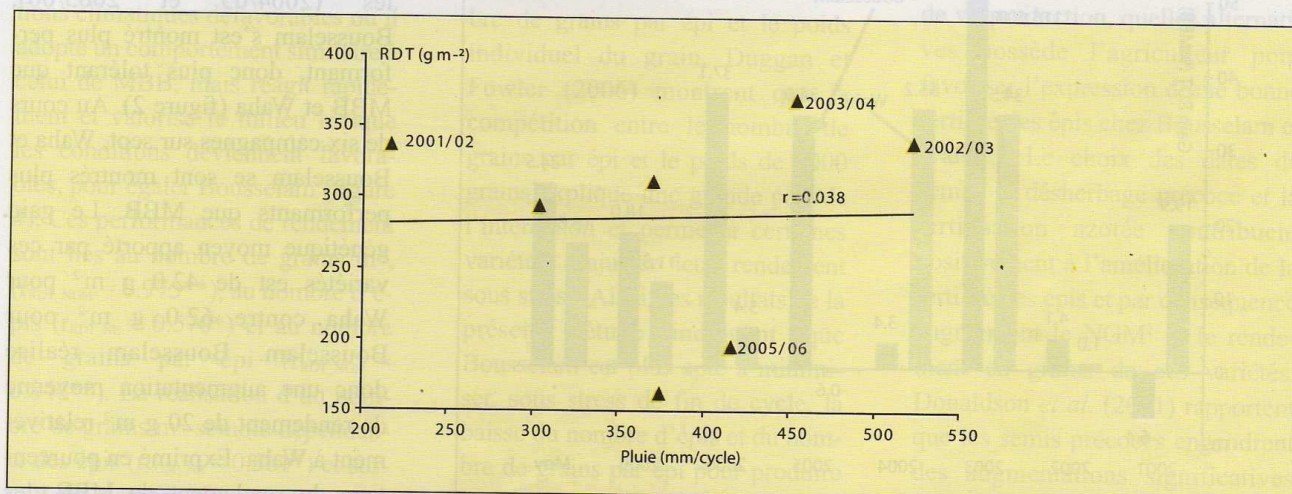


Figure 1. Relation entre la moyenne des rendements de MBB, Waha et Bousselam et le cumul pluviométrique de septembre à juin des 7 campagnes étudiées.



Tableau 3. Effet moyen génotype des variables mesurées.

Génotype	RDT	NGM ²	PMG	HT	NGE	NE	PREC
Waha	294.5	8077.7	37.3	61.6	19.6	407.4	119.0
Bousselam	314.4	8518.2	37.5	71.2	20.9	411.3	124.4
MBB	252.5	6823.3	37.7	80.5	16.9	400.5	128.5
Moy. Gén.	287.1	7806.4	37.5	71.1	19.1	406.4	123.9
Ppds5%	66.3	1929.8	2.0	6.8	3.3	50.5	2.1

NGM² = nombre de grains m⁻², PMG = poids de 1000 grains (g), HT = hauteur du chaume (cm), NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis m², PREC = durée de la phase végétative (du 1 janvier à l'épiaison, en jours).

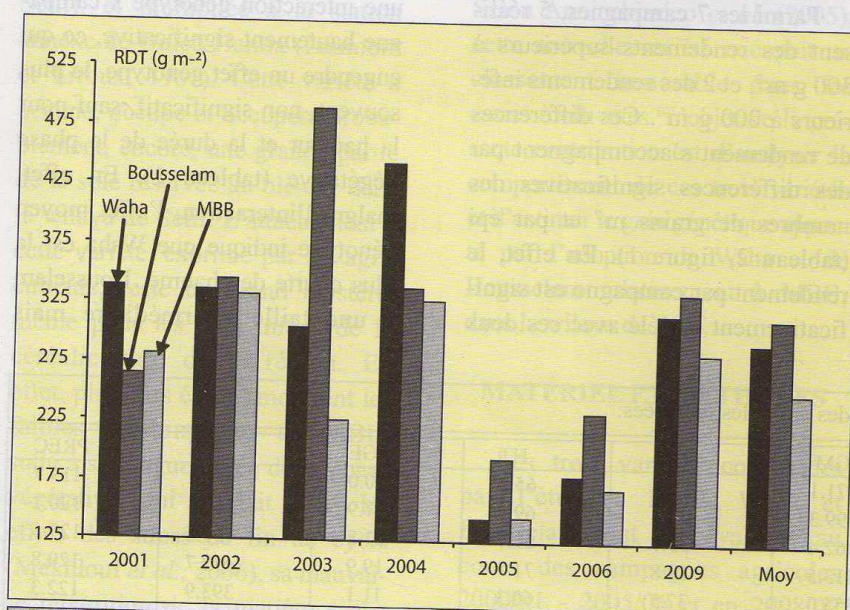


Figure 2. Variation du rendement des différents génotypes en fonction de la campagne agricole.

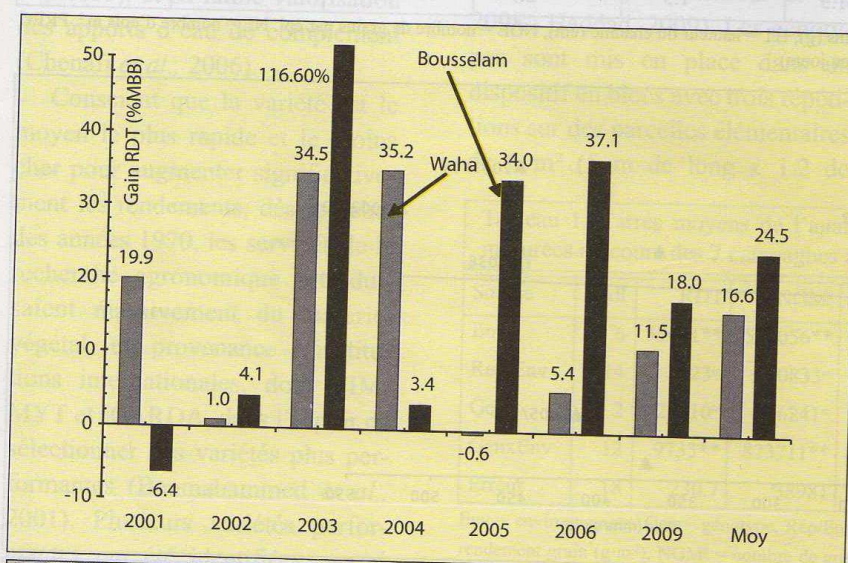


Figure 3. Gains de rendement, en % du rendement de MBB, de Waha et de Bousselam, réalisés au cours de sept campagnes sur le site ITGC de Sétif.

significativement plus haute que Waha et significativement plus courte que MBB qui est la variété la plus haute des trois (tableau 3). L'effet moyen génotype de la durée de la phase végétative indique aussi que Waha est la plus précoce (courte durée de la phase végétative). Bousselam présente une précocité intermédiaire entre Waha et MBB. MBB est la variété la plus tardive (tableau 3). Peu de différences de l'effet moyen génotype apparaissent entre les trois variétés pour les autres variables mesurées dont entre autre le rendement en grains.

Les résultats, de l'effet moyen génotype, suggèrent que le choix entre les trois génotypes est plus aisé pour la hauteur du chaume et la durée de la phase végétative, mais il est plus complexe pour les autres caractères où il faut faire une analyse des résultats par campagne, suite à la présence d'une interaction significative (tableau 1). L'analyse des rendements des trois génotypes par campagne indique que, dans le pire des cas (1 année sur 7), Waha, au même titre que Bousselam, donne un rendement au moins égal à celui de MBB.

Lors des années, les plus difficiles (2004/05 et 2005/06), Bousselam s'est montré plus performant, donc plus tolérant que MBB et Waha (figure 2). Au cours de six campagnes sur sept, Waha et Bousselam se sont montrés plus performants que MBB. Le gain génétique moyen apporté par ces variétés est de 42.0 g m⁻² pour Waha contre 62.0 g m⁻² pour Bousselam. Bousselam réalise donc une augmentation moyenne de rendement de 20 g m⁻² relativement à Waha. Exprimé en pourcentage du rendement de MBB, les gains réalisés au cours des sept campagnes d'étude varient de -0.6

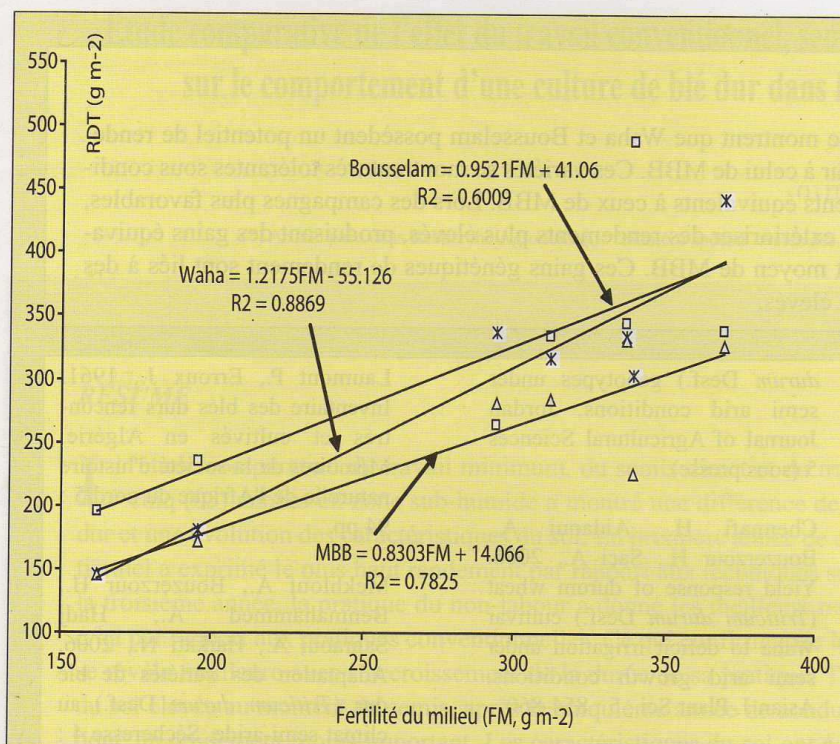


Figure 4. Réactivité de Waha, Bousselam et MBB à la fertilité du milieu (FM).

à 35.2% pour Waha avec une moyenne de 16.6% et de -6.4 à 116.3% pour Bousselam, avec une moyenne de 24.5% (figure 3).

Du point de réactivité vis-à-vis du milieu, Bousselam est similaire à MBB, avec cependant une grande différence pour le potentiel de rendement. Waha, par contre, se montre plus sensible vis-à-vis des conditions climatiques défavorables où il adopte un comportement similaire à celui de MBB, mais réagit rapidement et valorise le milieu lorsque les conditions deviennent favorables, pour égaler Bousselam (figure 4). Ces performances de rendement sont liés au nombre de grains m^{-2} , ($r_{RDT_NGM^2} = 0.975^{**}$), au nombre d'épis ($r_{RDT_NE} = 0.570^*$) et au nombre de grains par épi ($r_{RDT_NGE} = 0.846^{**}$). La réalisation d'un nombre de grains m^{-2} semble dépendante des épis ($r_{NGM^2_NE} = 0.561^*$) et surtout du nombre de grains par épi ($r_{NGM^2_NGE} = 0.885$). Elle est aussi affectée négativement par le poids

de 1000 grains ($r_{NGM^2_PMG} = -0.550^*$). Le nombre de grains par épi est lié négativement au poids de 1000 grains ($r_{NGE_PMG} = -0.527^*$). Sous les conditions de production de Sétif, le poids de 1000 grains (PMG) se réalise en pleine période de stress intense. De ce fait, un PMG élevé est le résultat des effets de compensation qui s'instaurent entre le nombre de grains par épi et le poids individuel du grain. Duggan et Fowler (2006) montrent que la compétition entre le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains explique une grande part de l'interaction et permet à certaines variétés d'ajuster leur rendement sous stress. Ainsi, les résultats de la présente étude indiquent que Bousselam est plus apte à minimiser, sous stress de fin de cycle, la baisse du nombre d'épis et du nombre de grains par épi pour produire un nombre de grains m^{-2} élevé et ainsi réalisé un haut rendement, comparativement à Waha et MBB.

De plus, l'augmentation du nombre de grains par épi d'une unité améliore le nombre de grains m^{-2} de 362.1 grains chez Bousselam. Par contre chez Waha, la même unité améliore cette composante de 426.2 grains, ceci indique que Waha valorise mieux toute augmentation de fertilité. Belkherchouche *et al.* (2009) ; Bouzerzour *et al.* (2009) ainsi que Haddad (2009) montrent que Waha et Bousselam sont le siège de changements importants, après le stade épiaison, moment où le col de l'épi perd de son poids, indice de translocation des assimilés vers le grain. Ces résultats corroborent ceux de De Vita *et al.* (2007) qui mentionnent que le gain génétique obtenu sur blé dur, en Italie, était associé à un grand nombre de grains produit par m^2 , à un nombre élevé d'épis et à une réduction de la hauteur du chaume.

Du point de vue sélection des futures variétés, il semble qu'il faut faire un tri sur la base des épis m^{-2} et puis un second tri sur la base du nombre de grains par épi, sur la fraction des lignées sélectionnées pour les épis. En dernier lieu, il ne faut retenir que les lignées qui extériorisent un PMG élevé. Du point de vue production, quelles alternatives possède l'agriculteur pour favoriser l'expression d'une bonne fertilité des épis chez Bousselam et Waha ? Le choix des dates de semis, le désherbage précoce et la fertilisation azotée contribuent positivement à l'amélioration de la fertilité des épis et par conséquence augmentent le NGM^2 et le rendement en grains de ces variétés. Donaldson *et al.* (2001) rapportent que les semis précoces engendrent des augmentations significatives des nombres d'épis m^{-2} et de grain par épi, suite à une meilleure utilisation des eaux pluviales.



Conclusion

Les résultats de la présente étude montrent que Waha et Bousselam possèdent un potentiel de rendement significativement supérieur à celui de MBB. Ces variétés se montrent très tolérantes sous conditions difficiles donnant des rendements équivalents à ceux de MBB. Lors des campagnes plus favorables, Waha comme Bousselam arrivent à extérioriser des rendements plus élevés, produisant des gains équivalents à 16.6 et 24.5% du rendement moyen de MBB. Ces gains génétiques de rendement sont liés à des nombres de grains par m² et par épi élevés.

Références bibliographiques

- Annicchiarico P., Abdellaoui Z., Kelkoul M., Zerargui H., 2005. Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *Journal of Agricultural Science*, 143 : 57-67.
- 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. *Pak. J. Agro.*, 4 : 360-365.
- Belkherchouche H., Fellah S., Bouzerzour H., Benmahammed A., Chellal N., 2008. Vigueur de la croissance, translocation et rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Revue Université de Biskra*, 7 : 25-30.
- Benmahammed A., Hassous K.L., Bouzerzour H., 2001. Synthèse des performances des nouvelles sélections d'orge (*Hordeum vulgare* L.) réalisées par les stations ITGC de Saida, Sidi Bel Abbès, Tiaret, Beni Slimane, Oued Smar, Khemis Miliana, Sétif et Khroub, au cours de la période 1980/81 à 1996/97. *Céréaliculture* 36, 13-20.
- Bouzerzour H., Benmahammed A., Mekhlouf A., 2009. Variation in early growth, canopy temperature, translocation and yield of four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi arid conditions. *Jordan Journal of Agricultural Sciences* 5 (sous presse).
- Chennafi H., Aidaoui A., Bouzerzour H., Saci A., 2006. Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci.*, 5 : 854-860.
- Cropstat 7.2. 2007. Free Statistics Package by IRRI, Manila, Philippines.
- De Vita P., Nicosia O.D., Nigro F., Platani C., Riefolo C., Di Fonzo N., Cattivelli L., 2007. Breeding progress in morphophysiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *Europ. J. Agronomy*, 26 : 39-53.
- Duggan B.L., Fowler D.B., 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. *Crop Sci.* 46 : 1479-1487.
- Donaldson, E., Schillinger W.F., Dofing S.M., 2001. Straw production and grain yield relationships in winter wheat. *Crop Sci.* 41 : 100-106.
- Haddad L., 2009. Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, Département agronomie, Faculté des sciences, UFAS, 70 pp.
- Laumont P., Erroux J., 1961. Inventaire des blés durs rencontrés et cultivés en Algérie. *Mémoires de la société d'histoire naturelle de l'Afrique du nord* 5 : 94 pp.
- 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* 4 : 507-513.
- Oudina M., Bouzerzour H., 1993. Variabilité du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sous l'influence du climat des Hauts-Plateaux Sétifiens. *Proceedings International Symposium on the agrometeorology of rainfed barley-based farming systems*. Ed M. Jones, G. Mathys and D. Rijks. 110-120.
- OpenStat. 2009. A free statistics package for instruction and analyses by William G. Miller.
- Richards R.A., Rebetzke G.J., Condon A.G., Van Herwaar-Den A.F., 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.* 42 : 111-121.
- 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.

Résumé : La présente thèse est structurée de deux parties, la première a permis d'illustrer le gain génétique apporté par les nouvelles sélections Waha et Bousselam comparativement à MBB. La réponse à la variation climatique des trois variétés de blé dur montre que les composantes du rendement sont différemment affectées. La deuxième partie révèle une variation du rendement grain de 12 génotypes de blé dur évalués sur cinq environnements. Le modèle AMMI explique 90.80% de la somme des carrés des écarts de l'interaction. Cette analyse montre également que le cultivar Waha présente une large adaptation à tous les sites, contrairement à Badre, Setifis, Gaviota durum et Mrb5 qui présentent une adaptation spécifique aux différents sites, ainsi l'analyse GGE-biplot indique que les cinq milieux d'étude représentent trois sous-régions où Mrb3, Bousselam et Badre étaient les plus performants et présentent une adaptation spécifique aux différents sites.

Mots clés : *Triticum durum*, interaction, AMMI, GGE-biplot, performance, stabilité.

Abstract: This thesis is structured in two parts, the first of which served to illustrate the genetic gain with the new selections Waha and Bousselam over MBB. The response of the three durum wheat varieties to climate variation showed that yield components were differentially affected. The second part shows yield variation of 12 durum wheat genotypes which were tested in five environments. AMMI models explains 90.80% of the interaction sum square. This analysis also shows that the cultivar Waha has a wide adaptation to all sites, unlike Badre, Setifis, Gaviota durum and Mrb5 who have a specific adaptation to different sites. While GGE-biplot analysis indicates that the five environments represented three sub-regions where Mrb3, Bousselam and Badre were the winners.

Keys words: *Triticum durum*, interaction, AMMI, GGE-biplot, performance, stability.

ملخص: يتمحور هذا البحث الى قسمين، القسم الاول يوضح اهمية الريح الوراثي بالنسبة لصنفي Waha و Bousselam مقارنة ب MBB. الاستجابة لتغير المناخ لدى الأصناف الثلاث من القمح الصلب تبين أن مكونات المردود تتأثر بشكل مختلف. يظهر القسم الثاني من الدراسة التباين في المردود الحبي لـ 12 صنف من القمح الصلب والتي تم تقييمها في خمسة مواقع. أوضح نموذج المركبات الأساسية للتفاعل AMMI 90.80 % من مجموع الانحرافات التربيعية للتفاعل. وأشار هذا التحليل إلى أن الصنف واحة يظهر تأقلم واسع لكافة المواقع التجريبية عكس Badre, Setifis, MRB5 لها تكيفات نوعية مع مختلف البيئات. نموذج GGE-biplot يشير إلى أن اوساط الدراسة الخمسة تمثل ثلاثة أقاليم فرعية، MRB 3، Bousselam و Badre ابدت قدرات عالية و كذا تأقلم نوعي خاص بكل موقع.

كلمات دالة : القمح الصلب، تفاعل، GGE-biplot، AMMI، استقرار، قدرة.
