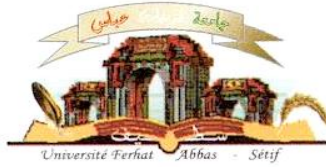


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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



جامعة فرحات عباس، سطيف 1  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

N°...../SN

## THÈSE

Présentée par

**HADDAD Leïla**

Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

**Filière: AGRONOMIE**

**Spécialité: PRODUCTION ET AMELIORATION DES VEGETAUX**

**THÈME**

**Analyses AMMI et GGE de l'interaction génotype x milieux du  
blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) et indentification des  
facteurs explicatifs de l'interaction**

Soutenue publiquement le 29 / 06 /2017

DEVANT LE JURY

Président	MEKHLOUF Abdelhamid	MCA Université Sétif-1
Directeur	BOUZERZOUR Hamenna	Pr. Université Sétif-1
Co-directeur	BENMAHAMMED Amar	Pr. Université Sétif-1
Examineurs	BENDERRADJI Laid	MCA Université Msila
	BENBELKACEM Abdelkader	DR Inraa-Constantine
	LAÏADI Ziane	MCA Université de Biskra

*Laboratoire de Valorisation des ressources biologiques et naturelles*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا

## **REMERCIEMENTS**

Louanges à « ALLAH » le tout puissant et le miséricordieux qui a orienté mes sens vers les bons choix et les bons réflexes afin que ce modeste travail aboutisse à sa bonne fin.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse le Professeur **Bouzerzour Hamenna**, de l'université Sétif -1, qui m'a fait l'honneur de m'encadrer. J'ai pu apprécier les qualités d'un homme de science et de pédagogie mais aussi des qualités humaines qui m'ont permis de travailler en toute sérénité et confiance. Je lui suis particulièrement reconnaissante et redevable pour le temps et l'énergie qu'il m'a toujours accordé pour me transmettre des conseils, des orientations et surtout une sagesse dont le moindre qu'en puisse dire et celle des grands maîtres, je peux m'estimer très privilégiée. Veuillez bien trouver ici l'expression profonde de mon estime.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mon co-directeur le professeur **Benmahammed Amar**, de l'université Sétif -1, qui a été au cours de toute la période de préparation de ce travail une source d'inspiration, d'encouragement et de soutien sans précédent. Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

Mes vifs remerciements vont au Docteur **Mekhlouf Abdelhamid** de l'université Sétif-1 qui m'a fait l'honneur de présider le jury et à Messieurs ; le Docteur **Benderradji Laid** de l'université de Msila, le Docteur **Benbelkacem Abdelkader** de l'INRAA Constantine et le Docteur **Laïadi Ziane** de l'université de Biskra d'avoir pris sur leur temps pour lire, examiner et juger ce modeste travail.

Je tiens également à remercier sincèrement et profondément toute l'équipe de l'ITGC Sétif ; Monsieur le directeur **Sersoub Djamel**, les ingénieurs chercheurs particulièrement Messieurs **Zerargui Houcine**, **Bachir Adel**, **M'hani Ameer** et **Harkati Bachir** ainsi que le reste du personnel et ouvriers de m'avoir accueillie et mis à ma

disposition les moyens nécessaires et indispensables pour mener à bon terme mes essais pendant trois années consécutives. Je les remercie tous considérablement.

Mes remerciements les plus sincères sont aussi adressés à l'équipe de l'INRAA-UR Sétif et plus spécialement Messieurs **Hannachi Abderrahmane**, **Gandouze Ali** et **Fellahi Zine El Abidine** pour leur aide, leurs conseils et leur savoir et savoir faire dont ils m'ont toujours fait part. Je leur suis particulièrement redevable et reconnaissante.

Je ne saurais oublier de remercier le CNCC avec tout son personnel pour l'aide précieuse et inconditionnelle et plus particulièrement celle du directeur Monsieur **Hadj Sahraoui**.

Je remercie l'équipe de mon laboratoire, le laboratoire de valorisation des ressources biologiques et naturelles de l'université de Sétif-1 pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires afin de réaliser les travaux et mesures expérimentaux de ma thèse.

Je remercie l'étudiant **Raggoub Abdelbasset** de l'université de M'Sila et les étudiants que j'ai encadrés au cours de la réalisation de ma thèse et qui m'ont aidé à mettre en place les essais et réaliser les mesures expérimentales.

Je tiens à adresser des remerciements particuliers à une amie et une collègue de l'Université de Sétif-1 Melle **Merouani Nawel** d'avoir été à mes côtés pendant les meilleurs mais surtout pendant les durs moments, un soutien que je n'oublierai jamais. Merci du fond du cœur.

Je remercie mes chers parents et que quoi que je dise, ne saurais exprimer envers eux ma reconnaissance pour leur patience, leur appui sans faille et leur présence à tous les instants et dans toutes les épreuves. Je remercie par la même occasion tous les membres de ma famille, mes frères et sœurs leur épouse et époux et leurs enfants pour le soutien qu'ils m'ont apporté.

Par peur d'afficher une liste non exhaustive de tous ceux que le destin à mis sur mon chemin et qu'ils n'ont pas hésité à apporter leur touche, quelle qu'elle soit, dans ce modeste travail ; je leur dis merci infiniment.

*Leïla*

## ملخص

هدف هذا العمل هو دراسة العوامل التي تفسر تفاعل أنماط وراثية x البيئات للقمح الصلب (*Triticum turgidum* L. var. durum) تحت الظروف الشبه الجافة لـ سطيف، من خلال استخدام نماذج AMMI و GGE وبعض مؤشرات الاستقرار. تحقيقا لهاته الغاية، زرع خمس عشرة صنف من القمح الصلب في ثلاثة مواسم متتالية (13/2012، 14/13 و 15/14) في تاريخين بذر (مبكر ومتأخر)، على مستوى ITGC سطيف. النتائج المنبثقة من هذه الدراسة تشير بأن آثار العام، النمط الوراثي وتاريخ البذر والتفاعلات هي هامة و هذا لمجموع 13 صفة مختبرة. من وجهة نظر مصادر التباين المهمة في محصول الحبوب، الاختلافات بين السنوات، تواريخ البذر، الأنماط الوراثية والتفاعل GXE شرح، على التوالي، 84.3٪، 1.6٪، 2.4٪ و 11.6٪ من مجموع الانحرافات التربيعية للعلاجات. شرح الانحدار المشترك 37.2٪ من 11.6٪ من مجموع الانحرافات التربيعية SCE لـ GXE. بينما شرح نموذج AMMI 92.1٪ من SCE للتفاعل و يعتبر أكبر بـ 2.5 مرة من الانحدار المشترك. يشير النموذج AMMI أن الأنماط الوراثية Setifis، Bousselam و Massara هم الأكثر فعالية (من ناحية الإنتاج) على عكس Tajdid، MBB و Cyprus2 التي هي أقل فعالية. وتشير نتائج تحليل الارتباط بين قيمة محصول الحبوب على IPCA1 ومعدل الأنماط الوراثية للصفات المورفولوجية أن عدد السنابل، وزنهم و وزن حبة يساهموا إلى حد كبير في التفاعل GXE للإنتاج، من هذا المنطلق يقترح بأنه للحد من IGE للإنتاج، يجب إبقاء تحت السيطرة الاختلاف، بين البيئات، لهذه الصفات، و التي ينبغي أن تكون في أدنى مستوى ممكن. بالنسبة للنموذج GGE، فهو يفسر 73.4٪ من SCE لآثار GGE للإنتاج، ويحدد 5 بيئات محتملة نموذجية والتي مثل ثلاثة منها من البيئات الستة التي تم اختبارها. يشير هذا النموذج أن Massara هي ذات إنتاج مرتفع ومستقر. وأخيرا، يتم فصل مختلف مؤشرات الاستقرار المحسوبة إلى مجموعتين، وهذا يتوقف على نوع الاستقرار المنشود، ديناميكي أو ثابت. من بين هذه المؤشرات، مؤشر Pi يظهر علاقة وثيقة جدا مع فعالية الإنتاج. ويظهر النمط الوراثي Setifis بأنه الأكثر فعالية واستقرار في حين المؤشر TOP يقترح النمط الوراثي Massara. هذان النمطان الوراثيان حققا ربح في الإنتاج بـ 42٪ و 35٪ نسبيا مقارنة بالشاهد MBB.

**الكلمات المفتاحية:** *Triticum durum*، أنماط وراثية، بيئات، تفاعل، AMMI، GGE، مؤشرات، فعالية، استقرار، صفات.

## Résumé

Le présent travail se fixe pour objectif l'étude des facteurs explicatifs de l'interaction géotypes x milieux du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) sous les conditions semi-arides de Sétif, par l'utilisation des modèles AMMI et GGE ainsi que quelques indices de stabilité. À cet effet, quinze variétés de blé dur ont été semées au cours de trois campagnes agricoles consécutives (2012/13, 13/14 et 14/15) en deux dates de semis (précoce et tardive), au niveau de l'ITGC Sétif. Les résultats qui s'y découlent de cette étude indiquent des effets moyens année, géotype et date de semis et des interactions significatifs pour l'ensemble des 13 caractères analysés. Du point de vue importance des sources de variation du rendement en grains, les différences entre années, dates de semis, géotypes et interaction GxE expliquent, respectivement, 84.3%, 1.6%, 2.4% et 11.6% de la somme des carrés des écarts des traitements. La régression conjointe explique 37.2% des 11.6% de la SCE de l'IGE. Alors que le modèle AMMI explique 92.1% de la SCE de l'interaction soit 2.5 fois plus que la régression conjointe. Le modèle AMMI indique que les géotypes Setifis, Bousselam et Massara sont les plus performants à l'inverse de Tajdid, MBB et Cyprus2 qui sont les moins performants. Les résultats de l'analyse des corrélations entre les scores du rendement en grains sur l'IPCA1 et les moyennes géotypiques des caractères morphologiques indiquent que le nombre d'épis, le poids des épis et le poids de 1000 grains contribuent significativement à l'interaction GxE du rendement, ce qui suggère que, pour réduire de l'IGE du rendement, il faut garder sous contrôle la variation, inter environnements, de ces caractères, qui doit être la plus faible possible. Pour le modèle GGE, il explique 73.4 % de la SCE des effets GGE du rendement et identifie 5 environnements potentiels typiques dont trois sont représentés parmi les six environnements testés. Ce modèle indique que Massara est performant et stable. Enfin, les différents indices de stabilité calculés sont séparables en deux groupes, selon le type de stabilité recherchée, dynamique ou statique. Parmi ces indices, l'indice Pi montre une relation très étroite avec la performance de rendement. Il identifie le géotype Setifis comme le plus performant et stable alors que l'indice TOP suggère le géotype Massara. Ces deux géotypes apportent un gain de rendement de 42% et 35% relativement au rendement du témoin MBB.

**Mots clés:** *Triticum durum*, géotypes, Environnements, Interaction, AMMI, GGE, indices, performance, stabilité, caractères.

## Abstract

This work's objective is the study of the factors explaining the interaction genotypes x environments of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under semi-arid conditions of Setif, through the use of AMMI and GGE models as well as some stability indices. For this purpose, fifteen varieties of durum wheat were sown in three consecutive crop years (2012/13, 13/14 and 14/15) in two planting dates (early and late), at the ITGC of Setif. The results that it follow from this study indicate means year, genotype and sowing date and interactions effects are significant for all 13 characters analyzed. From the point of view important sources of variation in grain yield, the differences between years, planting dates, genotypes and GxE interaction explain, respectively, 84.3%, 1.6%, 2.4% and 11.6% of the sum of squared deviations of treatments. The joint regression explained 37.2% of 11.6% of the SSD of IGE, while the AMMI model explained 92.1% of the SSD interaction is 2.5 times more important than the joint regression. The AMMI model indicates that Setifis Bousselam and Massara genotypes are the most efficient unlike Tajdid, MBB and Cyprus2 that are underperforming. The results of correlation analysis between the scores of grain yield on IPCA1 and average genotypic morphological characters show that the number of spikes, weight of spikes and weight of 1000 grains contribute significantly to the interaction GxE performance, suggesting that to reduce the IGE performance, must keep under control the variation, inter environments, of these characters, which should be as low as possible. For GGE model, it explains 73.4% of the SSD of GGE performance effects and identifies 5 potential typical environments which three are represented among the six tested environments. This model indicates that Massara is efficient and stable. Finally, the different calculated stability indexes are separated into two groups, depending on the desired, dynamic or static stability. Among these indices, the index Pi shows a very close relationship with the yield performance. It identifies the Setifis genotype as the most efficient and stable while the index TOP suggests Massara genotype. These two genotypes bring a performance gain of 42% and 35% relative performance of MBB witness.

**Key words:** *Triticum durum*, Genotypes, environments, Interaction, AMMI, GGE, Indices, Performance, Stability, Characters.



## *LISTE DES ABREVIATIONS*

Abréviations	Explication
AMMI	Additive Main Effect and Multiplicative Interaction
Anova	Analysis of Variance
ASV	Indice de stabilité AMMI (AMMI stability value)
BIO	Biomasse aérienne
BOT	Indice de Fox <i>et al.</i> , (1990) indiquant les géotypes médiocres (situés dans le dernier tiers des classements)
CC	Centimetre cube
Cimmyt	Center International Mejoramiento de Maíz y Trigo (The International Maize and Wheat Improvement Center)
CME	Carré moyen des écarts
Cv%	Coefficient de variation (Coefficient of variability)
DPV	Durée de la phase végétative
Faostat	Food And Agriculture Organization Statistics Division
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GGE	Genotype main effect and genotype x environment interaction
GXE	Interaction Génotype-Environnements
I Baj	Indice de stabilité de Bajpai (Stability index of Bajpai)
Icarda	International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas
IGC	International Grains Council
IGE	Interaction Génotype x Environnement
IPCA	Interaction principal component axis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITGC	Institut technique des grandes cultures
LC	Longueur du col de l'épi
MID	Indice de Fox <i>et al.</i> , (1990) indiquant les géotypes moyens (situés dans le tiers médian des classements)
MS	Matière sèche

NE	Nombre d'épis par m <sup>2</sup>
NGE	Nombre de grains par épi
NGM <sup>2</sup>	Nombre de grains par m <sup>2</sup>
PE	Poids des épis/m <sup>2</sup>
PHT	Hauteur de la plante
Pi	Indice de supériorité génotypique (Superiority index)
PLT	Nombre de Plantes levées/m <sup>2</sup>
PMG	Poids de 1000 grains
RDT	Rendement en grains, g/m <sup>2</sup>
RY	Rendement relatif (Relative yield)
S <sup>2</sup> e	Variance environnementale (Environmental variance)
SF	Surface de la feuille étandard
Spad	Soil and plant analysis device
Srank	Somme des rangs de Kang (Rank sum of Kang)
StI	Indice de stabilité (Stability index)
SuI	Indice de durabilité (Sustainability index)
TII	Nombre de talles herbacées/m <sup>2</sup>
TOP	Indice de Fox <i>et al.</i> , (1990) indiquant les meilleurs génotypes (situés dans le premier tiers des classements)
TRE	Teneur relative en eau
WANA	West Asia and North Africa
Wi	Écovalence de Wricke (Wricke's Ecovalence)
Yi.	Moyenne de rendement du génotype (Moyenne génotypique)
YSI	Indice de stabilité du rendement (Yield stability index)
$\sigma_i^2$	Variance de Shukla (Shukla stability variance)

---

## *LISTE DES FIGURES*

Numéro	Titre	page
<b>Figure 1.</b>	Origine génétique des blés (Feillet, 2000).....	05
<b>Figure 2.</b>	Évolutions de la production et de la consommation du blé en Algérie et déficit chronique (Chabane, 2010).....	08
<b>Figure 3.</b>	Evolution des superficies ( $\times 10^6$ ha), production ( $\times 10^6$ t) et rendement (t/ha) de blé dur en Algérie au cours de la période 2000/01 à 2011/12) (Benbelkacem, 2013).....	09
<b>Figure 4.</b>	Pluviométrie et température moyenne mensuelle du site ITGC de Sétif des trois campagnes d'études.....	43
<b>Figure 5.</b>	Réduction des valeurs moyennes des variables mesurées des campagnes 2014 et 2015 comparativement à celles de 2013.....	46
<b>Figure 6.</b>	Amplitude, exprimée en % de la moyenne de l'ensemble des variétés, des variables mesurées.....	49
<b>Figure 7.</b>	Groupage des génotypes évalués sur la base des moyennes de l'ensemble des dates et années étudiées.....	50
<b>Figure 8.</b>	Différences relatives entre les deux groupes de génotypes évalués classés sur la base des moyennes des variables mesurées de l'ensemble des dates et années étudiées.....	50
<b>Figure 9.</b>	Réduction des valeurs moyennes des variables mesurées de la date tardive comparativement à la date précoce (moyennes de trois années et des 15 génotypes).....	52
<b>Figure 10.</b>	Ecart du nombre de plants/m <sup>2</sup> (PLT) et du nombre de talles herbacées par m <sup>2</sup> (TLL) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	54
<b>Figure 11.</b>	Ecart de la hauteur de la plante (PHT) et de la surface de la feuille étendard (SF) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	54

<b>Figure 12.</b> Ecarts de la longueur du col (LC) et de la durée de la phase végétative (DPV) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	56
<b>Figure 13.</b> Ecarts de la biomasse (BIO) et du poids des épis (PE) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	57
<b>Figure 14.</b> Ecarts du nombre d'épi/m <sup>2</sup> (NE) et du nombre de grains par épi (NGE) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	57
<b>Figure 15.</b> Ecarts du NGM <sup>2</sup> et du poids de 1000 grains (PMG) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	59
<b>Figure 16.</b> Ecarts de rendement en grains (RDT) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années).....	60
<b>Figure 17.</b> Biplot AMMI <sub>1</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués en semis précoce au cours de trois années sur le site expérimental ITGC de Sétif.....	65
<b>Figure 18.</b> Biplot AMMI <sub>1</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués en semis tardif au cours de trois années sur le site expérimental ITGC de Sétif.....	66
<b>Figure 19.</b> Régression linéaire des performances de rendement en grains des génotypes extrêmes en fonction de l'indice du milieu (environnement).....	72
<b>Figure 20.</b> Relation entre les performances moyennes de rendement en grains des génotypes et les coefficients de régression linéaire.....	73
<b>Figure 21.</b> AMMI <sub>1</sub> -biplot du rendement en grains (g/m <sup>2</sup> ) des 15 génotypes de blé dur évalués sur 6 environnements représentés par trois années et deux dates de semis.....	75
<b>Figure 22.</b> Biplot-AMMI <sub>2</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués sur 6 environnements représentés par trois années et deux dates de semis.....	76
<b>Figure 23.</b> Variation du rendement en grains nominal des 15 génotypes de blé dur évalués sur les 6 environnements représentés par 3 années et 2 dates de semis.....	77

<b>Figure 24.</b> Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du nombre d'épis/m <sup>2</sup> des 15 géotypes étudiés.....	79
<b>Figure 25.</b> Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du poids des épis/m <sup>2</sup> des 15 géotypes étudiés.....	80
<b>Figure 26.</b> IGE du rendement en grains des deux variétés les plus interactives le long de l'IPCA <sub>1</sub> .....	81
<b>Figure 27.</b> Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du nombre d'épis /m <sup>2</sup> des deux variétés, Waha et Bousselam, les plus interactives le long de l'IPCA <sub>1</sub> .....	82
<b>Figure 28.</b> Variation des écarts dus à l'IGE du nombre d'épis /m <sup>2</sup> des 15 géotypes étudiés, selon les environnements.....	83
<b>Figure 29.</b> Environnements et géotype performant par environnement « which-won-where ».....	85
<b>Figure 30.</b> Discrimination et représentativité des différents environnements.....	87
<b>Figure 31.</b> Performances et stabilité des différents géotypes.....	88
<b>Figure 32.</b> Performance (G+IGE) et stabilité [ $\sigma^2_{G+IGE} / \sigma^2_{(G+IGE)mini}$ ] des différents géotypes évalués.....	89
<b>Figure 33.</b> Performance (G+IGE) des trois meilleurs géotypes pour le rendement en grains (Setifis, Sétif <sub>2013</sub> et Massara en comparaison avec les trois témoins (MBB, Waha et Bousselam) sur les 6 environnements testés.....	89
<b>Figure 34.</b> Performances des quatre géotypes pour le rendement en grains (Setifis, Bousselam, Waha et Massara dans les 6 environnements tests.....	93
<b>Figure 35.</b> Performances de rendement en grains des groupes de géotypes adaptés et non adaptés sur la base de l'indice de supériorité génotypique Pi dans les 6 environnements tests.....	96
<b>Figure 36.</b> Relations entre la moyenne des performances des rendements des différents géotypes dans les différents environnements et les indices de stabilité S <sup>2</sup> e, Top, RY, Pi, Bot, Sr, et Pi.....	103

<b>Figure 37.</b> Relations entre la moyenne des performances des rendements des différents géotypes dans les différents environnements et les indices de stabilité Bot, Sr et YSI.....	104
<b>Figure 38.</b> Plan formé par les composantes principales 1 et 2 des indices de stabilité des performances de rendement.....	108

---

## *LISTE DES TABLEAUX*

Numéro	Titre	Page
<b>Tableau 1.</b>	Superficies et rendement de quelques pays producteurs du blé dur (Faostat, 2013).....	07
<b>Tableau 2.</b>	Liste des génotypes de blé dur évalués au cours des campagnes 2012/13, 2013/14 et 2014/15 sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif.....	29
<b>Tableau 3.</b>	Squelette de l'analyse de la variance des données collectées à partir des expérimentations de 15 génotypes de blé dur conduites au cours de 3 années en deux dates de semis sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif ( Effets année, date de semis, génotype et interactions).....	33
<b>Tableau 4.</b>	Squelette de l'analyse de la variance des données collectées à partir des expérimentations de 15 génotypes de blé dur conduites au cours de 3 années en deux dates de semis sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif (Effets environnement = combinaisons année x date de semis, génotype et interaction).....	33
<b>Tableau 5.</b>	Valeurs du test F de l'analyse de la variance des caractères mesurés.....	45
<b>Tableau 6.</b>	Valeurs moyennes des variables mesurées de l'effet année.....	46
<b>Tableau 7.</b>	Valeurs moyennes des variables mesurées dues à l'effet génotype.....	48
<b>Tableau 8.</b>	Valeurs moyennes des variables mesurées de l'effet date de semis (moyenne des 15 génotypes et trois années).....	51
<b>Tableau 9.</b>	L'analyse combinée du rendement en grains des 15 génotypes testés au cours de trois années successives et deux dates de semis sur le site expérimental ITGC de Sétif.....	64
<b>Tableau 10.</b>	Analyse de la variance AMMI du rendement en grains des 15 génotypes testés au cours de trois années successives et deux dates de semis sur le site expérimental ITGC de Sétif.....	64

<b>Tableau 11.</b> Moyennes des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grains obtenu par date de semis, moyenne du rendement en grains par date et liste des génotypes à haut rendement par date.....	68
<b>Tableau 12.</b> Analyse de la variance combinée du rendement en grains, intégrant la régression conjointe et l'AMMI.....	69
<b>Tableau 13.</b> Moyennes du rendement en grains (RDT, g/m <sup>2</sup> ), coefficient de régression (b), écart type de b (et <sub>b</sub> ), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de l'interaction génotype x environnements (CME <sub>GxE</sub> ), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de la régression (CME <sub>Regr.</sub> ), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de la déviation de la régression (CME <sub>Dév.</sub> ), corrélation au carré entre l'effet moyen du génotype et l'indice du milieu et ordonnée à l'origine (a, g/m <sup>2</sup> ) des 15 variétés évaluées sur 6 environnements.....	71
<b>Tableau 14.</b> Valeurs des différences indices de stabilité et de performance du rendement en grains (t/ha) des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements.....	94
<b>Tableau 15.</b> Valeurs des différences indices de stabilité et de performance du rendement en grains (t/ha) des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements.....	98
<b>Tableau 16.</b> Coefficients de corrélation de rangs de Spearman entre le rendement et les valeurs des indices des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements (Coefficients au-dessous et probabilité au-dessus de la diagonale).....	102
<b>Tableau 17.</b> Coefficients de corrélation des indices avec les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales.....	107
<b>Tableau 18.</b> Valeurs prises par les indices liés au rendement des génotypes aux performances extrêmes.....	109
<b>Tableau 19.</b> Valeurs prises par les indices non liés au rendement des génotypes aux performances extrêmes.....	111

---



## SOMMAIRE

Contenu	Page
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	
<i>LISTE DES FIGURES</i>	
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	
INTRODUCTION .....	01
<i>CHAPITRE I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	
<b>1. Importance de la culture du blé dur (<i>Triticum turgidum</i> L. var. <i>durum</i>) .....</b>	<b>04</b>
1.1. Historique et génétique du blé dur .....	04
1.2. Superficies et productions du blé dur .....	06
1.2.1. Dans le monde .....	06
1.2.2. En Algérie .....	07
<b>2. Climat et production du blé dur .....</b>	<b>09</b>
<b>3. Amélioration du potentiel et stabilité du rendement du blé dur .....</b>	<b>11</b>
3.1. Caractères favorisant la stabilité sous contraintes abiotiques .....	11
3.2. Stratégies d'amélioration du potentiel et de la stabilité du rendement sous contraintes .....	13
3.3. Etude de l'interaction génotype x environnements .....	18
3.3.1. Modèles d'analyse .....	18
3.3.2. Etude de l'interaction .....	21
<b>4. Réponse des variétés probes à la variation des milieux .....</b>	<b>24</b>
<i>CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES</i>	
<b>1. Site, matériel végétal et dispositif expérimental .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Mesures et notations .....</b>	<b>30</b>
2.1. Nombre de plants .....	30
2.2. Nombre de talles herbacées .....	30
2.3. Hauteur de la végétation .....	30
2.4. Surface foliaire .....	31
2.5. Longueur du col de l'épi .....	31

2.6.	<i>Durée de la phase végétative</i> .....	31
2.7.	<i>Biomasse aérienne</i> .....	31
2.8.	<i>Nombre et poids des épis</i> .....	32
2.9.	<i>Rendement grain et composantes du rendement</i> .....	32
<b>3.</b>	<b><i>Analyse des données</i></b> .....	<b>32</b>
<b>4.</b>	<b><i>Analyse de la stabilité</i></b> .....	<b>36</b>
4.1.	<i>Indices paramétriques</i> .....	36
4.1.1.	<i>Moyenne génotypique (<math>Y_i</math>)</i> .....	36
4.1.2.	<i>Variance environnementale (<math>S_{env}^2</math>)</i> .....	36
4.1.3.	<i>Variance de Shukla (1972)</i> .....	37
4.1.4.	<i>Écovalence de Wricke (1962)</i> .....	37
4.1.5.	<i>Indice P de supériorité génotypique</i> .....	38
4.1.6.	<i>Le coefficient de variation (CV%)</i> .....	38
4.1.7.	<i>Indice de stabilité AMMI (ASV)</i> .....	38
4.1.8.	<i>Indice de stabilité AMMI (<math>D_i</math>)</i> .....	39
4.2.	<i>Indices non paramétriques</i> .....	39
4.2.1.	<i>Indice de Fox et al (1990)</i> .....	39
4.2.2.	<i>Somme des rangs de Kang</i> .....	40
4.2.3.	<i>Indice de stabilité (<math>StI</math>)</i> .....	40
4.2.4.	<i>Bajpai's indice de stabilité du rendement</i> .....	40
4.2.5.	<i>Indice de durabilité (<math>SuI</math>)</i> .....	41
4.2.6.	<i>Rendement relatif</i> .....	41
4.2.7.	<i>Indice de stabilité du rendement (<math>YSI</math>)</i> .....	42

### **CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION**

<b>1.</b>	<b><i>Pluie et températures des campagnes d'étude</i></b> .....	<b>43</b>
<b>2.</b>	<b><i>Variabilité phénotypique des caractères mesurés</i></b> .....	<b>44</b>
2.1.	<i>Effet moyen année</i> .....	44
2.2.	<i>Effet moyen génotype</i> .....	47
2.3.	<i>Effet moyen date de semis</i> .....	51

2.4.	<i>Interaction génotype x dates de semis</i> .....	53
2.5.	<i>Analyse de l'interaction du rendement en grains</i> .....	62
	2.5.1. <i>Analyse combinée du rendement en grains des années et dates de semis</i> .....	62
	2.5.2. <i>Régression conjointe</i> .....	68
	2.5.3. <i>AMMI modèle</i> .....	73
	2.5.3.1. <i>Rendement nominal et domaines de recommandation variétale</i> .....	77
	2.5.3.2. <i>Corrélations entre caractères morphologiques et IGE du rendement</i> .....	78
	2.5.4. <i>Modèle GGE</i> .....	84
	2.5.4.1. <i>Which Won Where</i> .....	84
	2.5.4.2. <i>Discrimination, performance et stabilité</i> .....	86
2.6.	<i>Stabilité des performances de rendement</i> .....	91
	2.6.1. <i>Moyenne des performances de rendement</i> .....	92
	2.6.2. <i>Variance environnementale (<math>S^2_{env}</math>)</i> .....	93
	2.6.3. <i>Ecovalence (<math>W_i</math>)</i> .....	94
	2.6.4. <i>Variance de Shukla (<math>\sigma^2_i</math>)</i> .....	94
	2.6.5. <i>Indice de supériorité génotypique (<math>P_i</math>)</i> .....	95
	2.6.6. <i>Coefficient de variation (<math>C_v</math> %)</i> .....	95
	2.6.7. <i>Valeur de la stabilité AMMI (ASV)</i> .....	96
	2.6.8. <i>Indices de Fox et al., (1990)</i> .....	97
	2.6.9. <i>Somme des rangs de Kang (<math>S_{rank}</math>)</i> .....	97
	2.6.10. <i>Indice de stabilité (<math>StI</math>)</i> .....	98
	2.6.11. <i>Indice de stabilité de Bajpai's (Bajpai's I)</i> .....	98
	2.6.12. <i>Indice de durabilité (<math>SuI</math>)</i> .....	99
	2.6.13. <i>Rendement relatif (RY)</i> .....	100
	2.6.14. <i>Indice de stabilité du rendement (YSI)</i> .....	100
	2.6.15. <i>Indice de désirabilité de Hernandez (<math>D_i</math>)</i> .....	101

<i>3. Relations entre la performance de rendement et les valeurs des indices</i>	101
<i>4. Typologie des indices</i> .....	107
<i>CONCLUSION</i> .....	113
<i>PERSPECTIVE</i> .....	116
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	117

---

# *INTRODUCTION*

## ***INTRODUCTION***

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. Il est la première céréale cultivée en Algérie, en termes de superficies et de production, occupant presque la moitié des 3 millions hectares, destinés à la céréaliculture. La production, qui avoisine les 1.6 millions de tonnes, ne couvre que 30 à 35% des besoins. La cause principale de la faiblesse de la production est le bas niveau des rendements atteint actuellement et qui, quoiqu'en augmentation depuis 1990, reste en deçà de ce qu'il devrait être, ne dépassant pas une moyenne de 1.5 t/ha (Benbelkacem, 2013).

La majeure partie des emblavures du blé dur est concentrée sur les hautes plaines, région caractérisée par de l'altitude (700 à 1100 m), des hivers froids, un régime pluviométrique faible et irrégulier, associés à l'apparition de vents chauds et desséchants en fin de cycle de la culture (Chennafi *et al.*, 2006).

Les changements climatiques risquent d'exagérer l'effet de ces contraintes qui s'ajoutent aux contraintes d'ordre techniques qui relèvent de l'application d'itinéraires techniques souvent peu ambitieux et de l'utilisation de variétés non adaptées (Bahlouli *et al.*, 2005). En effet les nouvelles variétés adoptées sont sélectionnées sur la base de leur potentiel de rendement sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs de la production en milieux variables (Laala *et al.*, 2009).

La variation des rendements, d'une année à l'autre et d'un lieu à l'autre, a pour origine la sensibilité du matériel végétal à l'effet combiné des basses températures hivernales, du gel printanier, du stress hydrique et des hautes températures de fin de cycle de la culture (Bahlouli *et al.*, 2005 ; Chennafi *et al.*, 2006 ; Mekhlouf *et al.*, 2006). La variation des performances génotypiques, engendrée par l'interaction génotype x milieu, rend difficile la sélection et la recommandation des génotypes performants et stables (Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Nouar *et al.*, 2012).

Les alternatives qui s'offrent, pour contrer ces contraintes, sont peu nombreuses (irrigation, extension des superficies emblavées, développement de variétés à haut potentiel de rendement et résilientes vis-à-vis des stress biotiques et abiotiques) et difficiles à mettre en œuvre hormis l'aspect variétal. La stratégie la plus favorable est de développer des variétés dont le rendement est élevé et pour cela elles doivent être tolérantes aux diverses contraintes qui caractérisent les milieux de production (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012).

Pour ce faire, il devient plus que nécessaire d'avoir des connaissances plus approfondies du comportement de la plante sous conditions limitantes pour développer de nouvelles variétés capables de résister au manque d'eau associé aux températures basses et élevées et à la salinité (Munns *et al.*, 2012 ; Adjel *et al.*, 2013).

Les futures variétés doivent avoir, en plus de bonnes valeurs agronomiques et technologiques, la capacité de valoriser, au mieux, les spécificités des différents terroirs et itinéraires techniques. Elles doivent réagir positivement à la diversité des situations dans lesquelles elles sont placées où dans lesquelles la variation de milieu les place (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Debaeke *et al.*, 2010 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012 ; Adjabi *et al.*, 2014).

Ceci suppose que l'évaluation des comportements de matériel végétal sous sélection doit prendre en considération une diversité de milieux représentative de celles sous lesquelles les futures variétés doivent produire (Prost *et al.*, 2007 ; Menad *et al.*, 2011 ; Meziani *et al.*, 2011 ; Bendjamaa *et al.*, 2014).

Ceci suppose aussi que la sélection doit porter sur les caractéristiques qui augmentent, aussi bien le potentiel de rendement en grains, que la tolérance vis-à-vis des stress, quoique certains résultats préliminaires obtenus avec du matériel végétal sensible, semblent indiquer que les deux objectifs sont difficilement associables, sous les conditions des hautes plaines orientales (Mekhlouf *et al.*, 2006 ; Benmahammed *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012).

En effet, la sélection pour l'adaptation générale est acquise au dépend du potentiel de rendement, alors que la sélection pour l'adaptation spécifique l'est au dépend de la tolérance (Kadi, 2012 ; Nouar, 2015).

La présence de l'interaction suggère la sensibilité des nouvelles variétés aux divers stress abiotiques qui caractérisent l'environnement de production. La sélection est confrontée, de ce fait, à deux alternatives, soit cibler des géotypes tolérants et plastiques qui réagissent moins à la variabilité du milieu de production et qui, le plus souvent, présentent un faible potentiel de rendement ou bien utiliser positivement l'interaction pour valoriser la fertilité des différents milieux et terroirs (Kadi *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012).

Identifier et comprendre les causes explicatives de l'interaction du géotype avec la diversité des milieux rencontrés est un préalable pour pouvoir sélectionner pour les deux objectifs à la fois : potentiel de rendement et résilience vis-à-vis des stress.

Des expérimentations multi localités et multi années sont à même d'engendrer des données très informatives au sujet de la nature de l'interaction et des causes probables, du moins chez des variétés sondes ou témoins standards, de permettre d'étudier la répétitivité ou la répétabilité de l'interaction et de comparer les gains génétiques induits par la sélection pour l'adaptation générale vs l'adaptation spécifique (Nouar *et al.*, 2012 ; Adjabi *et al.*, 2014).

La présente investigation se fixe pour objectif d'étudier l'interaction géotype x milieux du blé dur en utilisant les modèles GGE et AMMI, d'identifier les causes explicatives de cette interaction et d'analyser le type de stabilité (agronomique, statique ou biologique) qui caractérise les géotypes testés.



*CHAPITRE -I-*  
*REVUE BIBLIOGRAPHIQUE*

## **CHAPITRE I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1. IMPORTANCE DE LA CULTURE DU BLE DUR (*Triticum turgidum* L. var. *durum*)**

#### **1.1. HISTORIQUE ET GENETIQUE DU BLE DUR**

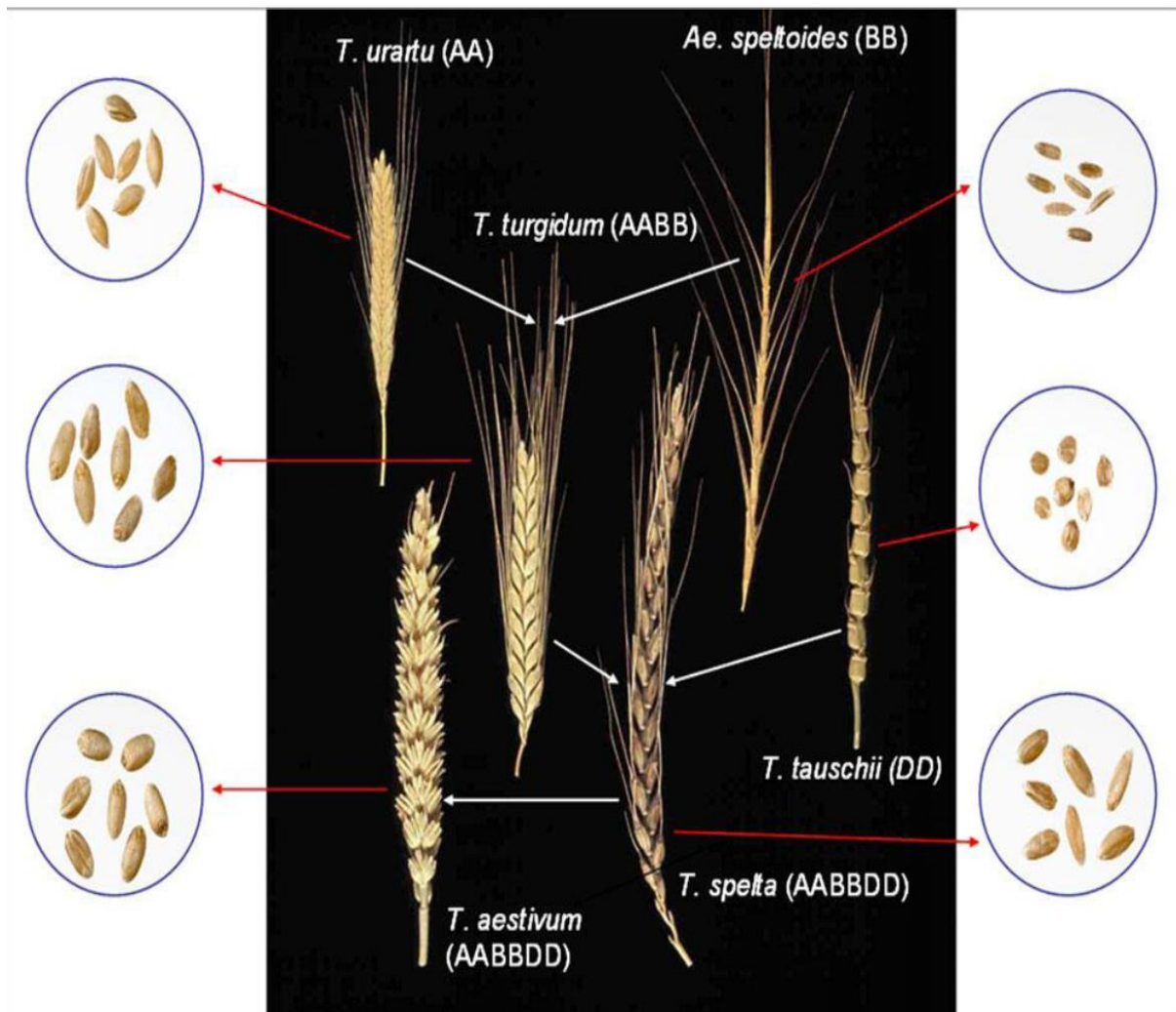
Le blé appartient à la tribu des *Triticeae* de la famille des *Poaceae*. Les blés (*Triticum*) et le seigle (*Secale*) forment la sous tribu des *Triticineae* (Simmonds, 1976). Du point de vue classification le genre *Triticum* est séparé en trois groupes (embranchements) : les blés diploïdes portant 14 chromosomes ( $2n=2X=14$ ), les blés tétraploïdes portant 28 chromosomes ( $2n=4X=28$ ) et les blés hexaploïdes avec 42 ( $2n=6X=42$ ) chromosomes (Simmonds, 1976).

Historiquement les blés sauvages tétraploïdes ont été domestiqués au Proche Orient où ils sont largement répandus. En effet comparativement aux blés diploïdes, les dimensions plus importantes de l'épi et du grain rendaient les blés tétraploïdes plus attractifs pour la domestication. Géographiquement les blés tétraploïdes sont apparus dans une large zone couvrant partiellement les territoires actuels de la Turquie, de la Syrie, de l'Iraq et de l'Iran (Feldman, 2001).

Génétiquement, le blé dur est un allo tétraploïde portant deux génomes, A et B, repartis sur un total de 28 chromosomes ( $2n=4x=28$ ), dont le nombre basique est de 7 chromosomes. Une certaine homéologie existe entre les différentes paires chromosomiques des génomes A et B, de sorte que pour chaque paire de chromosomes du génome A correspond une paire de chromosomes homéologues du génome B, à laquelle elle est étroitement apparentée (Wall *et al.*, 1971).

Durant la méiose, l'appariement des chromosomes est, cependant, limité aux seuls chromosomes homologues suite à l'action de gènes inhibiteurs. Parmi ces gènes figure le gène *Ph1* situé sur le long bras du chromosome 5B qui a le plus d'effet (Wall *et al.*, 1971).

Les analyses cytologiques et moléculaires indiquent que les sous-espèces de *T. turgidum* sont issues de l'hybridation naturelle de *Triticum monococcum* L. subsp. *boeoticum* (Boiss.), synonyme *Triticum urartu*, porteur du génome A, avec une espèce de blé diploïde inconnue portant le génome B (Figure 1, Feillet, 2007). L'analyse moléculaire indique que le génome de *Aegilops speltaoides* s'apparente plus au génome B du blé dur et du blé tendre (Talbert *et al.*, 1995; Khlestkina et Salina, 2001).



**Figure 1.** Origine génétique des blés (Feillet, 2007).

L'analyse de l'ADN des chloroplastes montre aussi que *Aegilops speltaoides* est probablement le donneur maternel du blé dur (Wang *et al.*, 1997). Cette hybridation naturelle donna naissance à l'amidonner sauvage *Triticum turgidum* ssp. *diccocoïdes* (Korn.) Thell, qui fut domestiqué et s'est répandu dans les régions de la Méditerranée

et de l'Afrique (Bozzini, 1988). Une grande variabilité des blés tétraploïdes issus de l'amidonner sauvage s'est développée dont certaines sous espèces ont été caractérisées tels que :

- *Triticum turgidum* ssp. *paleocolchicum*,
- *Triticum turgidum* ssp. *polonicum*,
- *Triticum turgidum* ssp. *turanicum*,
- *Triticum turgidum* ssp. *carthlicum*,
- *Triticum turgidum* ssp. *turgidum*
- *Triticum turgidum* ssp. *durum* .

Parmi ces sous espèces *Triticum turgidum* ssp. *durum* est la plus cultivée de par le monde. *Triticum turgidum* ssp. *durum* et *Triticum turgidum* ssp. *paleocolchicum*, *Triticum turgidum* ssp. *polonicum*, *Triticum turgidum* ssp. *turanicum*, *Triticum turgidum* ssp. *carthlicum* et *Triticum turgidum* ssp. *turgidum* sont inter compatibles et produisent des hybrides fertiles (Kimber et Sears, 1987).

## **1.2. SUPERFICIES ET PRODUCTIONS DU BLE DUR**

### **1.2.1. DANS LE MONDE**

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) est cultivé dans les régions à climat méditerranéen telles que celles de l'Afrique du nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Egypte), le sud de l'Europe (Espagne, France, Italie, Grèce), et le Moyen Orient (Turquie, Syrie, Palestine). En Amérique, le blé dur est cultivé dans les états du Dakota et du Montana, aux USA, et dans le Saskatchewan et l'Alberta, au Canada. Le blé dur est aussi produit en Russie, au Kazakhstan et en Inde (Elias et Manthey, 2005).

La production mondiale de blé dur avoisine les 36 millions de tonnes, soit près de 5% de la production mondiale totale des blés dur et tendre (IGC, 2013). Les superficies emblavées et les rendements moyens de la période 2000 à 2012, des principaux pays producteurs sont donnés au tableau 1.

**Tableau 1.** Superficies et rendements de quelques pays producteurs du blé dur (Faostat, 2013).

Pays	Superficies x 1000 ha	Pays	Rendement (t/ha)
Algérie	1272.2	Canada	2.06
Canada	2141.0	Espagne	2.21
Italie	1494.8	France	4.66
Maroc	995.8	Inde	2.64
Monde	13670.8	Italie	2.66
Russie	1122.2	Mexique	4.91
Turquie	1188.9	Syrie	2.72
		USA	2.31
		Monde	2.08

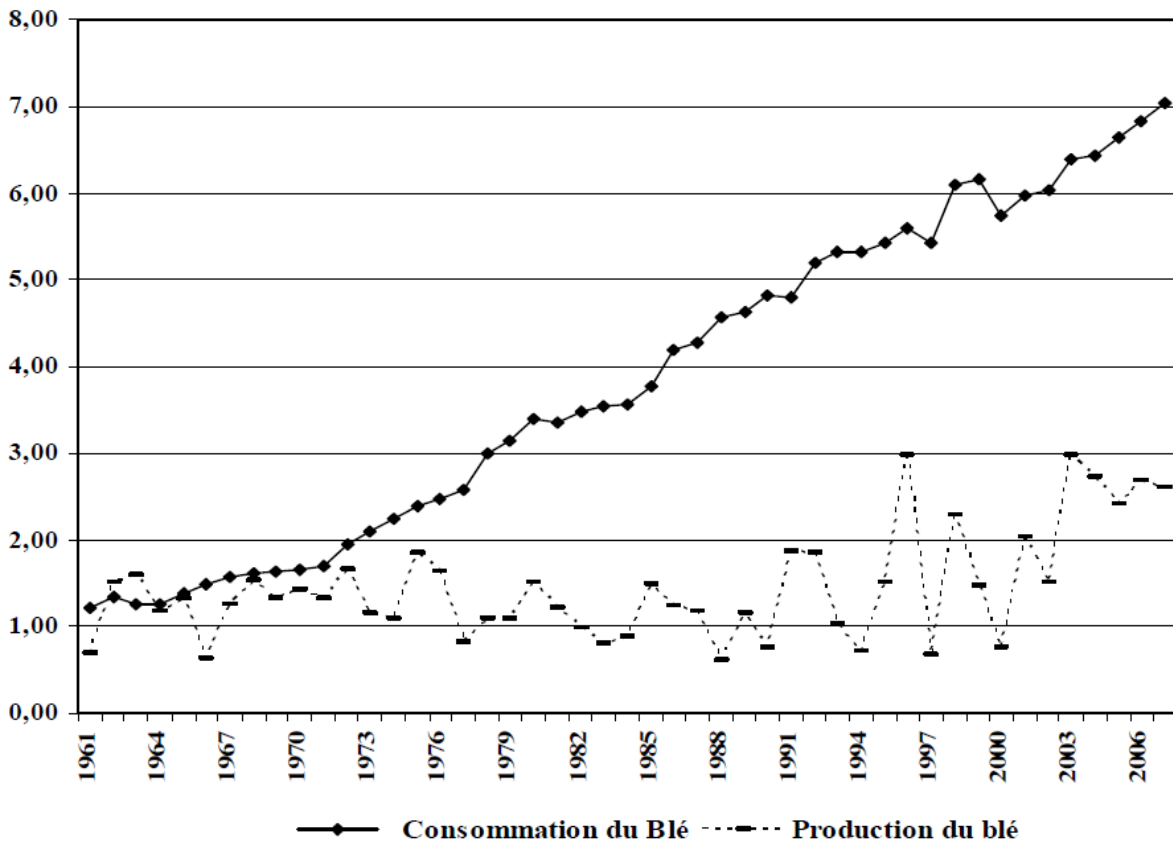
### **1.2.2. EN ALGERIE**

Avec une consommation de plus de 203 kg par personne et par an, la céréaliculture algérienne est structurellement inapte à satisfaire une demande de plus en plus importante. Cette insuffisance est provoquée par l'effet d'une pression démographique galopante et d'une faible productivité agricole, le plus souvent mise sur le compte des aléas climatiques (Chabane, 2010).

En effet la demande en blé a été multipliée par 5 depuis l'indépendance et le déficit chronique entre offre et demande ne cesse de croître (Figure 2). Cette situation fait de l'Algérie un des plus gros importateurs mondiaux de céréales, au même titre que l'Europe des 27, le Brésil et l'Egypte (Onfaa, 2016).

En Algérie, le blé dur est produit dans les trois régions les plus favorables : la zone littorale (600 mm), les plaines intérieures (450 à 600 mm) et la partie nord des hauts plateaux, (350 à 450 mm). Il est conduit sous conditions pluviales subissant les effets des contraintes climatiques dont le déficit hydrique et les températures élevées de fin de cycle sont les plus dominantes (Bouzerzour *et al.*, 2002 ; Mekhlouf *et al.*, 2006).

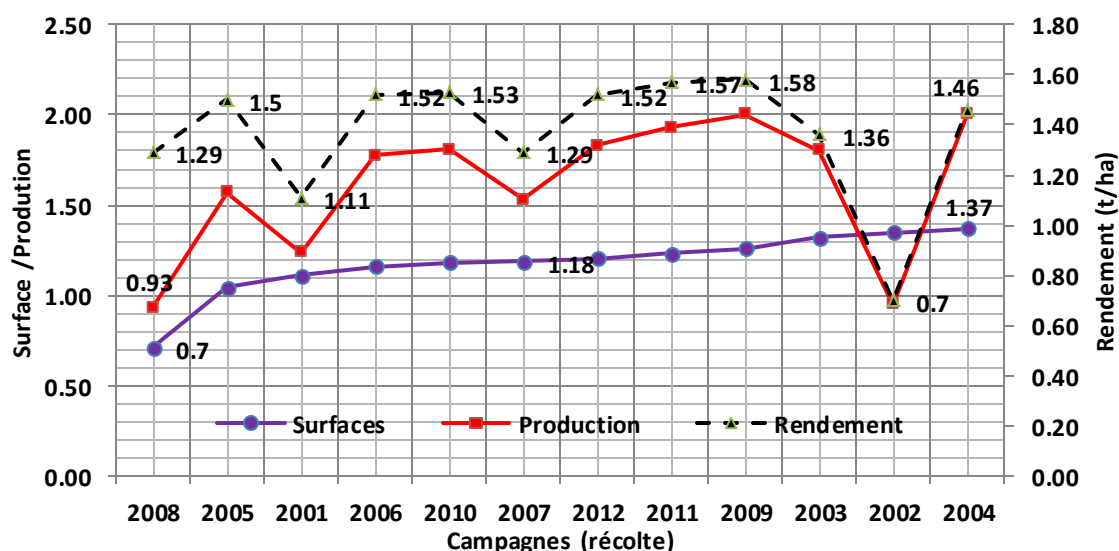
Millions de tonnes



**Figure 2.** Évolutions de la production et de la consommation du blé en Algérie et déficit chronique (Chabane, 2010).

Examinées sur une période de douze campagnes agricoles, les superficies et productions déclarées du blé dur sont indiquées en figure 3 (Benbelkacem, 2013). Bien que la sole, emblavée en blé dur, soit relativement importante, au regard des superficies réservées à la céréaliculture, les rendements restent faibles, oscillant entre 0.70 et 1.58 t/ha (Figure 3).

Le blé dur est semé sur une étendue moyenne de 1.2 millions d'hectares, et sa production représente 45% de la production totale des céréales. L'orge et le blé tendre suivent avec une participation de 28% et 24%, respectivement (Fellahi *et al.*, 2013).



**Figure 3.** Evolution des superficies (x 10<sup>6</sup> ha), production (x 10<sup>6</sup> t) et rendement (t/ha) de blé dur en Algérie au cours de la période 2000/01 à 2011/12) (Benbelkacem, 2013).

## 2. CLIMAT ET PRODUCTION DU BLE DUR

À l'instar des pays du Maghreb, l'Algérie se trouve dans une région à prédominance aride et semi-aride avec un climat méditerranéen dans la partie Nord et saharien dans la partie sud. Les précipitations pluviométriques moyennes dans la région du Maghreb et notamment en Algérie sont relativement faibles par rapport à celles des autres pays du bassin méditerranéen.

Le climat de type méditerranéen est caractérisé par une longue période de sécheresse estivale variant de 3 à 4 mois sur le littoral et de 5 à 6 mois au niveau des Hautes Plaines et supérieure à 6 mois au niveau de l'Atlas Saharien. Les précipitations accusent une grande variabilité annuelle, augmentant d'Ouest en Est de 450 mm/an à Oran à plus de 1000 mm/an à Annaba (Chabane, 2010).

Cette situation est en voie d'évoluer vers un scénario plus complexe avec des manifestations plus importantes des contraintes hydrique et thermique pour la culture du blé dur, suite aux changements climatiques en cours (Habash *et al.*, 2009).

L'augmentation de la température, depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, est un fait avéré, et elle a été de l'ordre de 0.3 à 0.6°C au cours de la décennie 1990 (IPCC, 2007). Ce changement climatique affectera négativement l'agriculture et notamment celle des pays de l'Afrique du Nord où les risques de sécheresses, accompagnées de températures élevées sont plus élevés (IPCC, 2007; Bates *et al.*, 2008 ; Habash *et al.*, 2009).

Quoique le blé dur est considéré comme une espèce tolérant les stress abiotiques, avec ces changements climatiques drastiques, il devient impérieux d'envisager des solutions durables pour minimiser et gérer les effets négatifs de ces changements (Nachit et Elouafi, 2004).

Ceci oblige les sélectionneurs à se préparer à ces changements et à donner un poids plus important à la tolérance des stress dans le processus de sélection et de repositionner le cycle de la culture à la période de l'année la moins défavorable possible (Mekhlouf *et al.*, 2006), en plus d'autres techniques telles que la récolte des eaux et l'adoption d'une agriculture de conservation (Lahmar et Bouzerzour, 2010).

Selon Belaid *et al.*, (2005), la fréquence des périodes de sécheresse, même en plein hiver, lors du tallage, a augmenté au cours des trois dernières décennies en Afrique du nord affectant négativement la production du blé dur.

De plus une tendance au raccourcissement du cycle végétative de la culture du blé dur a été notée suite à l'augmentation de la température et au manque d'eau, qui deviennent plus cycliques en fin de cycle (Belaid *et al.*, 2005). Ces changements du climat ont exagéré la pression exercée par les diverses maladies cryptogamiques et insectes nuisibles spécialisés sur le blé dur.

En effet l'apparition de la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), du tan spot (*Pyrenophora tritici repentis*) et de la septoriose (*Septoria tritici*) est devenue plus omniprésente sous hivers relativement plus cléments (Yahyaoui, 2002). La question,



qui se pose, est quelles sont les stratégies à adopter pour améliorer et stabiliser la production du blé dur sous ces conditions qui sont déjà relativement plus contraignantes et qui risquent de le devenir plus sous les effets des changements climatiques ?

### **3. AMELIORATION DU POTENTIEL ET DE LA STABILITE DU RENDEMENT DU BLE DUR**

#### **3.1. CARACTERES FAVORISANT LA STABILITE SOUS CONTRAINTES ABIOTIQUES**

Les plantes s'adaptent aux stress à différents niveaux organisationnels : moléculaire, biochimique et physiologique. Pour sélectionner et développer des variétés qui résistent aux stress abiotique, il est important de connaître les concepts définissant la résistance. Les plantes répondent et s'adaptent au déficit hydrique en mettant en œuvre diverses stratégies : esquive, évitement et résistance, qui ont été définies par Levitt (1982) et largement détaillées par Ashraf *et al.*, (2010) ; Reynolds *et al.*,(2012) et Rebetzke *et al.*,(2012) et repris, entre autres, par Hamli, (2016) et Belkherchouche, (2016).

Ces stratégies sont sous tendues par des caractéristiques tel le développement en profondeur du système racinaire, l'ajustement osmotique, la translocation des réserves glucidiques stockées dans le col de l'épi, l'enroulement foliaire, le raccourcissement du cycle, et le stay green ou une faible vitesse de dessèchement du feuillage (leaf firing) (Richards *et al.*, 2002 ; Plaut *et al.*, 2004 ; Slafer *et al.*, 2005). L'adoption d'une quelconque de ces stratégies, pour être efficace, doit valoriser l'eau utilisée par la plante, tout en maximisant le rendement potentiel, qui est mesuré en absence de stress.

L'amélioration de la tolérance des stress peut être obtenue soit par sélection directe ou par sélection indirecte pour le rendement dans l'environnement ciblé (Araus *et al.*, 2008). En effet la sélection directe sur la base du rendement est la plus simple mais son efficacité est généralement mise en cause, suite à la présence

d'interaction génotype x environnements et à la faible valeur de l'héritabilité de ce caractère, notamment sous conditions contraignantes (Ceccarelli *et al.*, 2010).

La sélection indirecte est pratiquée sur la base des caractères qui présentent une étroite liaison avec le rendement grain mais qui en plus sous-tendent la résistance vis-à-vis des stress. Cette approche est dite analytique ou physiologique (Araus *et al.*, 2008). Dans cette approche plusieurs caractères sont suggérés comme critères de sélection dont entre autres :

- l'efficacité d'utilisation de l'eau (Richards *et al.*, 2002, Guo *et al.*, 2006),
- l'efficacité d'utilisation de la radiation (Cossani et Reynolds, 2012),
- la sénescence de la feuille étendard (Christopher *et al.*, 2008),
- la durée du remplissage du grain (Motzo *et al.*, 2010),
- l'indice de récolte (Richards *et al.*, 2002),
- la longueur des racines séminales (Manschadi *et al.*, 2008),
- la vigueur de la croissance précoce (Richards *et al.*, 2002),
- la teneur relative en eau (Clarke *et al.*, 1992),
- la remobilisation des réserves stockées dans le col (Blum, 1998 ; Cossani et Reynolds, 2012, Belkherchouche *et al.*, 2015),
- les dimensions de la graine (Lopez-Castaneda *et al.*, 1996),
- la longueur de la coléoptile (Rebetzke *et al.*, 2007)
- la biomasse élevée au stade épiaison (Bouzerzour *et al.*, 1998 ; Rebetzke *et al.*, 2002),
- la capacité photosynthétique de l'épi (Cossani et Reynolds, 2012 ; Belkherchouche *et al.*, 2015),
- la dépression de la température de la canopée (Ayeneh *et al.*, 2002),
- l'ajustement osmotique (Morgan, 1984 ; Hamli *et al.*, 2015),
- Le contenu en chlorophylle et la fluorescence chlorophyllienne (Hamblin *et al.*, 2010 ; Hamli *et al.*, 2015)

Les difficultés pour le sélectionneur résident dans le fait de comment combiner ces caractères dans un même fond génétique pour associer le potentiel de rendement et la résistance aux stress. Les modèles de simulation intégrant la variation des paramètres climatiques et les caractéristiques génotypiques sont mis à contribution pour identifier les caractères les plus déterminants du potentiel de rendement et de la tolérance des stress (Semenov et Halford, 2009).

Ainsi le réchauffement de l'atmosphère due aux changements climatiques dans la région méditerranéenne induira une accélération de la croissance avec une réduction de la durée du cycle végétatif, ce qui affecte le potentiel de production. La simulation de la croissance sous ces conditions suggère que la réduction du potentiel de rendement est due au raccourcissement du cycle végétatif, notamment la durée de la phase de remplissage suite aux effets du déficit hydrique et de l'élévation de la température de l'air ambiant (Parry *et al.*, 2005 ; Ferrise *et al.*, 2009).

### ***3.2. STRATEGIES D'AMELIORATION DU POTENTIEL ET DE LA STABILITE DU RENDEMENT SOUS CONTRAINTES***

Dans le domaine de l'amélioration du potentiel et de la stabilité du rendement, l'exemple vient des stratégies développées par les centres internationaux d'amélioration des plantes, CIMMYT et ICRDA. CIMMYT a mis en œuvre des efforts dans ce sens en association la réduction de la hauteur de la plante (gènes *Rht* issus de Norin 10) à la résistance aux diverses maladies, notamment les rouilles et la septoriose, qui sont prédominantes en milieux favorables et sous irrigation. Le rendement potentiel est généralement obtenu sous conditions d'humidités favorables mais pas ou peu sous conditions contraignantes sujettes à des stress abiotiques sévères (Ceccarelli *et al.*, 1998 ; Reynolds et Borlaug, 2006 ; Ceccarelli *et al.*, 2010).

L'ICRDA table sur la diversité des sites de sélection que ce centre utilise et qui se caractérisent par un gradient d'humidité (entre 200 et 800 mm) et des stress

abiotiques (gel, hautes températures et déficit hydrique terminales) et biotiques (septoriose, tâche auréolée, rouilles) et la variabilité inter campagnes pour cribler des lignées qui combinent le potentiel, la tolérance et la stabilité.

La tolérance des stress biotiques et abiotiques a été introduite des espèces sauvages apparentées au blé dur tels que *Triticum carthlicum*, *T. dicoccoides*, *Aegilops species*, *T. monococcum*, *T. polonicum*, et *T. dicoccum* (Nachit et Elouafi, 2004). Cette stratégie est complétée par des tests physiologiques utilisant des outils tels que le Spad, le thermomètre à infrarouge et le carbone isotopique <sup>13</sup>C (Pask *et al.*, 2012). Au cours des dernières années l'utilisation de la génomique est de plus en plus intégrée au processus de sélection du blé dur sous climat méditerranéen (Oukarroum *et al.*, 2009)

La stabilité du rendement est un critère important pour le développement d'une variété. Elle est perçue en termes de réduction de la fréquence des rendements faibles. C'est un objectif de sélection prioritaire dans les environnements contraignants (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Bahlouli *et al.*, 2005 ; Kadi *et al.*, 2012).

La stabilité est conditionnée par l'adaptation aux milieux. Cette adaptation peut être dans l'espace, dite stabilité spatiale ou dans le temps, stabilité temporelle (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Adjabi *et al.*, 2007). Cependant Lin et Binns (1991) définissent la stabilité du rendement comme la régularité du rendement d'une année à l'autre ; alors que l'adaptation représente la capacité d'un génotype a donné des rendements élevés quel que soit la localité.

L'adaptation est conditionnée par la présence/absence de l'interaction génotype-milieu. En effet la non adaptation est induite par des interactions génotype-milieu, ce qui fait que l'étude de l'adaptation passe généralement par l'analyse de l'interaction génotype x milieu (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2000 ; Menad *et al.*, 2011 ; Bendjamaa *et al.*, 2014). L'environnement représente un ensemble de conditions

climatiques, de types de sols et de pratiques culturales d'un essai conduit dans un lieu donné et au cours d'une année donnée (Annicchiarico *et al.*, 2005).

Il y a interaction génotype x milieux lorsqu'on est en présence d'une large variation des caractéristiques génotypiques de résistance/sensibilité vis-à-vis des stress et/ou en présence de larges différences d'expression des stress entre environnements tests (Dieng, 2007).

L'interaction génotype x milieux peut être quantitative ou non cross over si l'ordre de classement des génotypes se maintient d'un lieu à un autre, elle est de nature qualitative ou cross over si des inversions de l'ordre de classement des génotypes se produisent (Baker, 1988 ; Baril, 1992 ; Romagosa et Fox, 1993 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012).

Pour minimiser les effets de l'interaction génotype x milieu, il faut comprendre comment les génotypes répondent à la variation des conditions climatiques, aux stress abiotiques et biotiques et aux itinéraires techniques appliqués qui prédominent dans les environnements où seront cultivées les futures variétés. Ceci pour que les agriculteurs qui adopteront ces variétés puissent en tirer le rendement maximum, avec moins de risques, et pour minimiser la différence ou gap entre le rendement observé chez les agriculteurs et le potentiel obtenu par les sélectionneurs au niveau des stations de recherche (Godfray *et al.*, 2010).

Pour une meilleure efficacité de la sélection, il apparaît que le sélectionneur doit placer les génotypes à tester dans des environnements qui diffèrent pour des caractéristiques connues et si possible mesurables (altitude, type de sol, pluie, gel, température élevée, radiation solaire, localité) croisés à des itinéraires techniques variés (date, densité de semis, fertilisation N, désherbage, phytosanitaire, irrigation). Un tel dispositif permet d'identifier les génotypes à large adaptation qui se montrent relativement peu sensibles à la variation inter environnementale dans le sens le plus

large, de ceux qui se montrent plus spécialisés à certaines conditions plus qu'à d'autres (Godfray *et al.*, 2010 ; Prowse et Brook, 2011).

Dans ce contexte, Menad *et al.*, (2011) rapportent que l'adoption d'une stratégie, qui exploite positivement l'interaction sur les sites à haut potentiel de production, permet d'améliorer le rendement grain de 6%, comparativement à la sélection pour l'adaptation générale. Il en est de même que Asseng *et al.*, (2008) à travers des simulations faisant varier la pluie et les températures saisonnières sur une période de 100 ans (1900 à 2000), montrent que le rendement grain varie de 0.1 à 4 t/ha lors des campagnes peu pluvieuses et 1 à 7 t/ha lors des années pluvieuses. Ceci montre que l'effet de certaines contraintes ne peut être évité ou minimisé parce qu'il est de nature imprévisible.

Nouar (2015) rapporte le cas de deux cultivars nouvellement sélectionnés et qui sont largement adoptés sur les hautes plaines Sétifiennes. Ces cultivars montrent des différences de réponses vis-à-vis des stress abiotiques. Waha montre une sensibilité au nombre de jours dont la température est supérieure à 25°C, alors que Bousselam montre une sensibilité au déficit hydrique. Ceci suggère que lors des campagnes caractérisées par une fin de cycle chaude, c'est Waha qui présente une interaction génotype x environnements significative alors que lors des années caractérisées par une fin de cycle sec, c'est Bousselam qui présente une interaction significative.

Ludwig et Asseng (2006) mentionnent que dans les cas où les contraintes limitantes du rendement sont le déficit hydrique et les hautes températures de fin de cycle, parce que les pluies deviennent rares où parce que le sol a une faible capacité de rétention d'eau où parce que le milieu se caractérise par une demande climatique élevée, il est judicieux de sélectionner des génotypes alternatifs qui se distinguent par un cycle végétatif court, pour positionner la phase de remplissage du grain en dehors du pic de l'avènement de la contrainte (Abbassenne *et al.*, 1998).

Stapper et Fischer (1990) mentionnent que sous climat méditerranéen, le choix de la date de semis et celui du génotype à semer sont déterminantes du rendement escompté. La période de semis débute dès que les premières pluies efficaces sont enregistrées et se termine lorsque tout semis effectué donnera un rendement significativement plus faible que celui escompté.

Le semis précoce est à privilégier, parce qu'il permet une production plus élevée de la biomasse et échappe aux stress de fin de cycle (Stapper et Harris 1989). Cependant cette pratique de semis précoce est peu recommandée dans les régions où les risques de gel printanier sont élevés (Mekhlouf *et al.*, 2006).

Dans ce contexte, Eastham *et al.*, (1999) notent que malgré que le sol au moment du semis ait la même quantité d'eau pour les deux dates de semis, précoce et tardive, l'humidité résiduelle à la récolte était significativement plus faible sous semis précoce que sous semis tardif. Ceci indique que le semis précoce a eu la capacité et les conditions d'utiliser plus d'humidité du sol que le semis tardif, ce qui améliore son efficacité d'utilisation de l'eau.

Gilbert et Tekauz (2011) mentionnent que là où le blé dur est la culture dominante, la notion de risque, et donc la présence de l'interaction génotype x environnements, est à gérer à travers l'itinéraire technique en cultivant plusieurs variétés de durées du cycle différentes, semées à des dates optimales.

Basford et Cooper (1998) font remarquer que prétendre connaître les explications des causes de la présence de l'interaction est une tâche difficile parce que l'interaction n'est généralement pas répétable ni dans le temps ni dans l'espace. De plus la variation intra environnement est la résultante d'une composante prévisible et d'une composante non prévisible. La pluie et les températures d'un lieu constituent la composante imprévisible alors que la nature du sol d'un lieu, les dates de semis ainsi que l'itinéraire appliqué constituent la composante prévisible (Allard et Bradshaw, 1964).

La composante imprévisible est la plus difficile à gérer en amélioration des plantes et notamment la variation des conditions de croissance (pluie et température) d'une année à l'autre. De plus l'interaction génotype x années représente la plus large contribution à la somme des carrés des écarts de l'interaction, elle est souvent 4 à 5 fois plus importante que l'interaction génotype x localités (Allard et Bradshaw, 1964).

Anderson (2010) rapporte, que l'estimation des effets génotype (G), localité (E) et l'itinéraire technique (M = management), confirme que l'effet M contribue plus à l'amélioration du rendement que l'effet G.

### ***3.3. ETUDE DE L'INTERACTION GENOTYPE X ENVIRONNEMENTS***

#### ***3.3.1. MODELES D'ANALYSE***

Différents modèles ont été proposés pour étudier l'interaction génotype x environnements. Ils reposent tous sur un suivi du comportement d'un jeu de variétés, dans une large gamme d'environnements différents (Ceccarelli *et al.*, 1998 ; Sinebo, 2005). Ils diffèrent dans les concepts et les procédures biométriques par lesquelles l'interaction est analysée :

- Analyse de la variance d'interaction (Wricke et Weber 1986 ; Magari et Kang 1997).
- Analyse de la régression linéaire (Finlay et Wilkinson, 1963 ; Eberhart et Russel 1966)
- Analyse de la régression bilinéaire (Navabi *et al.*, 2006).
- Analyse AMMI (Additif Main effet Multiplicative Interaction) (Crossa, 1990 ; Gauch et Zobel, 1996).
- Analyse génotype et génotype x environnements (GGE) (Yan, 2002),
- Utilisation des modèles non paramétriques (Sabaghnia *et al.*, 2006 ; Benmahammed *et al.*, 2010).



Ces différents modèles, revus par Lin *et al.*, (1986) et Crossa, (1990), ciblent trois types de stabilité. La stabilité biologique ou type 1 est mesurée par la variance inter-environnements qui doit être la plus faible en valeur pour un génotype stable. La stabilité de type 2 est mesurée par la régression linéaire et où le génotype stable est celui dont la réponse est parallèle à la moyenne des réponses des génotypes auxquels il est comparé.

La stabilité de type 3 est mesurée par la déviation de la régression. Dans ce cas un génotype stable est celui dont la déviation est nulle ou minimale. Lin et Binns (1988) proposent la stabilité de type 4, mesurée par la moyenne des variances entre environnements imprévisibles (années), calculée à partir des environnements prévisibles (localités).

Du point de vue pratique, la mesure de la stabilité seule n'est d'aucune utilité, car elle doit être associée au rendement grain qui est d'intérêt dans l'analyse de l'interaction et l'objectif du sélectionneur. Certains modèles proposés prennent en considération le rendement et la stabilité simultanément (Benmahammed *et al.*, 2010).

Ainsi l'utilisation de l'indice de la stabilité du rendement noté  $YS_i$ , proposé par Magari et Kang (1993) intègre la notion de stabilité à la performance de rendement. Selon Hussein *et al.*, (2000), la sélection sur la base de cet indice identifie des génotypes performants et stables. Cependant Bajpai et Prabhakaran (2000) font remarquer que cet indice donne plus de poids au rendement qu'à la stabilité, alors que c'est la stabilité qui est d'importance pour les agriculteurs.

Les méthodes non paramétriques, basées sur l'ordre de classement des génotypes par environnement, sont plus préférables parce que moins exigeantes en termes hypothèses restrictives notamment l'homogénéité des variances, la normalité de distribution des valeurs et l'additivité des effets. Elles prennent en considération le rendement et la stabilité (Hühn, 1979).

De plus, ces méthodes ne sont pas sensibles aux erreurs de mesures (Nassar et Hühn, 1987). Lin et Binns (1988) proposent un indice de supériorité génotypique qui associe rendement et stabilité. Les faibles valeurs de  $P_i$  sont caractéristiques des génotypes performants et stables (Benmahammed *et al.*, 2010).

Cependant la sélection basée sur l'indice  $P_i$ , élimine les génotypes à adaptation spécifique au profit de ceux à large adaptation (Lin et Binns, 1988). Kang (1993) rapporte que la méthode de la somme des rangs ainsi que les indices  $S_{i1}$  et  $S_{i2}$  de Hühn (1979) sont efficaces pour sélectionner simultanément pour le rendement et la stabilité. Bajpai et Prabhakaran (2000) rapportent que ces indices donnent plus de poids au rendement qu'à la stabilité du fait que les génotypes performants se montrent généralement moins stables.

Bajpai et Prabhakaran (2000) proposent trois indices donnant des poids différents au rendement et à la stabilité et montrant des corrélations étroites avec le rendement et avec la stabilité. Kulshreshtha *et al.*, (2002) rapportent que les indices proposés par Bajpai et Prabhakaran (2000) sont plus efficaces que l'indice de la somme des rangs de Kang et Pham (1991) et les indices  $S_{i1}$  et  $S_{i2}$  de Hühn (1979).

Rao *et al.*, (2004) proposent deux indices de sélection, l'un pour l'interaction génotype x localités x années et l'autre pour l'interaction génotype x environnements. Les statistiques et les indices développés et proposés pour évaluer simultanément la stabilité et la performance sont peu utiles s'ils ne montrent pas une certaine répétabilité dans l'espace et le temps.

La répétabilité est définie comme la corrélation entre les estimateurs de la stabilité entre deux groupes d'environnements (Virk *et al.*, 1985; Leon et Becker, 1988). La répétabilité indique que l'ordre de classement des génotypes ou les estimateurs de la stabilité, dans un groupe d'environnements, restent identiques ou assez proches dans les groupes d'environnements testés (Jalaluddin et Harrison, 1993).

Les informations au sujet de la répétabilité des paramètres de la stabilité sont peu nombreuses dans la littérature. Fatunla et Frey (1976) rapportent que les coefficients de régression (b) de 180 lignées d'avoine n'étaient pas répétables entre groupes constitués de 7 environnements chaque.

### **3.3.2. ETUDE DE L'INTERACTION**

L'AMMI est appliquée pour interpréter l'interaction génotype x environnements des performances observées chez plusieurs espèces (Brancourt- Hulmel *et al.*, 1997; Blanche *et al.*, 2006 ; Ouk *et al.*, 2007 ; Annichiarico *et al.*, 2005 ; Ajabi *et al.*, 2014). Les résultats indiquent que, généralement, l'AMMI absorbe et explique une grande proportion de l'interaction (Brancourt- Hulmel *et al.*, 1997; Blanche *et al.*, 2006 ; Ouk *et al.*, 2007 ; Annichiarico *et al.*, 2005 ; Ajabi *et al.*, 2014). La performance et la stabilité sont prises en considération séparément, au-delà de la première composante d'interaction, ce qui limite de l'efficacité d'interprétation de l'interaction par cette méthode.

De plus l'interprétation graphique n'est aisée que si seule la première ou les deux premières composantes sont significatives et expliquent une grande proportion de l'interaction, au-delà de ce nombre l'interprétation devient lourde et onéreuse (Yan et Tinker, 2006).

Vijayakumar *et al.*, (2001) ont étudié l'effet de l'interaction génotype x environnements des performances de rendement de 16 génotypes de riz (*Oryza L.*) conduits dans 11 environnements. Ils rapportent une interaction significative qui affecte l'ordre de classement des génotypes dans les différents environnements.

Ces auteurs rapportent que les effets principaux génotypes, environnement et la première composante principale de l'interaction, qui était significative, absorbent 86.9% de la somme des carrés des écarts des traitements. Une contribution de l'effet

moyen environnement de plus de 80% est mentionnée par Yan et Kang (2003), d'une étude de 13 années conduite sur le soja.

Annichiarico *et al.*, (2005) comparent la régression conjointe au modèle AMMI dans l'analyse du rendement de 24 génotypes de blé dur évalués au cours de 3 années sur un total de 47 environnements. Les résultats indiquent que le modèle AMMI était plus efficace dans l'interprétation de l'interaction que la régression conjointe. Le modèle AMMI et la classification des environnements identifient deux grandes sous régions où la sélection pour l'adaptation spécifique apporte un gain de rendement de l'ordre de 2 à 7% de plus que la sélection pour l'adaptation générale.

Ces auteurs suggèrent que la spécialisation des programmes de sélection pour cibler la spécificité des sous-régions identifiées pourrait augmenter le gain réalisable. Kadi *et al.*, (2010) analysent l'interaction du rendement de 13 variétés d'orge évaluées au cours de cinq campagnes agricoles, par les modèles de la régression conjointe et AMMI. Les résultats indiquent une interaction significative dont 26.8% sont expliqués par la régression conjointe contre 84.7% par le modèle AMMI.

L'adaptation générale était absente parmi les génotypes évalués qui montrent plutôt une adaptation étroite et aucun génotype n'était performant sur l'ensemble des environnements testés, suggérant de pratiquer la sélection pour l'adaptation spécifique. Cependant comme la variation est d'origine temporelle (années), donc imprévisible, la sélection spécifique est peu opérante.

Meziani *et al.*, (2011) analysent l'interaction du rendement de 12 variétés d'orge évaluées au cours d'une seule campagne agricole, dans 6 localités par les modèles de la régression conjointe et l'AMMI. L'analyse AMMI indique que 29.33% de la somme des carrés des écarts des traitements sont dus à l'interaction dont les deux premières composantes absorbent 82.65%.

Le modèle AMMI identifie les géotypes présentant une large adaptation, avec un rendement au-dessus de la grande moyenne, un rendement nominal et une stabilité élevés. Parmi les caractères induisant l'interaction figurant la hauteur de la végétation, la durée de la phase végétative, le nombre d'épis, ainsi que le cumul des pluies hivernales et la pluie du mois de juin (Meziani *et al.*, 2011).

Nouar *et al.*, (2012) analysent l'interaction du rendement grain de 12 variétés de blé dur évaluées dans 5 localités. La régression conjointe se montre moins efficace dans l'explication de l'interaction. L'AMMI, par contre, explique 90.80% de la somme des carrés des écarts de l'interaction et indique que le cultivar Waha présente une large adaptation à tous les sites testés. La sélection pour l'adaptation spécifique apporte un gain de rendement de 10.51% comparativement à la sélection pour l'adaptation générale (Nouar *et al.*, 2012).

Bendjamaa *et al.*, (2014) conduisent une étude pour analyser l'interaction du rendement grain de 23 variétés de blé dur dans quatre localités au cours de deux années. Les résultats indiquent que le rendement grain varie significativement en fonction des années, des localités et des interactions année x localités, géotype x localités et géotype x localités x années, qui absorbent, respectivement, 0.8, 63.1, 21.0, 5.8 et 3.40% de la somme des carrés des écarts de la source traitement.

La régression conjointe et l'AMMI expliquent, respectivement, 30.08% et 83.35% de la somme des carrés des écarts de l'interaction géotype x localités. Les localités testées sont très interactives suggérant deux domaines de recommandations variétales. Sur la base du rendement nominale, la sélection pour l'adaptation spécifique apporte un gain de 7.87% comparativement à la sélection pour l'adaptation générale.

Le modèle GGE effectue des analyses similaires à celle de l'AMMI avec la différence que l'effet de l'environnement n'est pas pris en considération. Dans ce modèle seul l'effet géotype et l'interaction, les plus intéressants et qui sont d'intérêt pour le

sélectionneur, sont analysés (Yan, 2001). Les résultats sont donnés sous formes graphiques et portent, entre autres, sur :

- Les relations entre génotypes et environnements,
- Les performances des génotypes par environnement et en moyenne des différents environnements,
- La stabilité des génotypes sur l'ensemble des environnements
- L'ordre de classement des génotypes par environnement et sur l'ensemble des environnements,
- Le génotype le plus performant par environnement (which won where)
- Le groupage des environnements par domaine de recommandation ou zonage.

Nouar *et al.*, (2012) rapportent que l'analyse des données par la méthode GGE regroupe les 5 localités étudiées en 3 sous-régions où Mrb<sub>3</sub>, Boussalem et Badre sont les variétés les plus performantes. Kandus *et al.*, (2010) mentionnent que l'analyse AMMI était plus efficace pour décrire l'interaction GxE exprimée par les variétés de maïs. Stojaković *et al.*, (2010) ; Mitrovic *et al.*, (2012) et Rad *et al.*, (2013) rapportent, par contre, que les deux méthodes d'analyse, l'AMMI et la GGE fournissent des résultats similaires.

Yan *et al.*, (2007) ainsi que Ding *et al.*, (2007) concluent que l'analyse GGE est plus efficace que l'AMMI dans l'interprétation de l'interaction. La GGE fournit des interprétations graphiques, ce qui est d'un grand apport pour le sélectionneur. Samonte *et al.*, (2005) notent que l'AMMI et la GGE se complètent mutuellement.

#### **4. REPONSE DES VARIETES SONDES A LA VARIATION DES MILIEUX**

Les performances d'une variété varient d'un environnement à un autre. La cause principale est l'Interaction Génotype x Environnement (IGE), très importante, qui

induit des classements différents entre variétés selon les sites et les systèmes de cultures appliqués.

Selon Barbottin (2004) la variabilité des performances d'une variété inter milieux est liée à la variabilité des facteurs du milieu et à la sensibilité de la variété à ces facteurs lorsqu'ils deviennent limitants. Pour pouvoir conseiller une variété ou pratiquer une sélection, il est nécessaire d'évaluer l'importance de ces variations et d'en comprendre la cause : pratiques culturales, stress biotiques ou abiotiques (Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Jackson, 2005)

Dans ce contexte, Meziani (2016) rapportent les résultats de l'évaluation de 15 géotypes, durant deux années consécutives, qui révèlent la prépondérance de l'effet année sur l'expression des caractères mesurés. Le rendement en grains est fortement dépendant de la biomasse aérienne au même titre que la paille produite. L'analyse de la relation entre la biomasse aérienne et le rendement en grains indique que la biomasse est valorisée différemment, sous forme de grains, selon les campagnes.

Sur la base de 11 caractères mesurés, qui présentent tous des IGE, trois comportements génotypiques contrastés, selon les campagnes, sont identifiés : des géotypes qui performant uniquement en bonne année, ceux qui, au contraire, minimisent la baisse du rendement en année défavorable, mais qui ne sont pas les meilleurs en année favorable, et ceux qui présentent de faibles performances au cours des deux années (Meziani, 2016). Les géotypes qui valorisent aussi bien les années favorables (absence de stress) que non favorables (présence des stress), et qui sont d'intérêts ne sont pas présents.

Pour Gouy *et al.*, (2013), afin d'améliorer la sélection, l'interaction (IGE) doit être non seulement décrite (analyses statistiques traditionnelles) mais surtout expliquée pour pouvoir être utilisée efficacement. Barbottin (2004) mentionne que le rendement d'une culture de blé s'élabore progressivement, au cours de phases

successives pendant lesquelles sont fixées les composantes du rendement. Or, plusieurs facteurs du milieu peuvent influencer le niveau de ces composantes.

En comparant les valeurs de rendement et de composantes avec des valeurs de référence connues pour la variété considérée, on peut en déduire quelles sont les composantes affectées par un facteur limitant et avec quelle intensité. On identifie ainsi la période du cycle au cours de laquelle il faut rechercher l'occurrence de facteurs limitants, qui sont ensuite identifiés à partir des observations et mesures réalisées au cours du cycle de culture.

Le rendement en grains, sous système de culture pluviale et sous environnement contraignant, est la résultante de la durée, de la vitesse de remplissage et de la capacité de translocation des assimilats stockés dans la tige. Sous de telles conditions de production, la durée de remplissage et par conséquent le poids du grain atteignent rarement leurs valeurs maximales, d'où une baisse du rendement en grains (Abbassenne *et al.*, 1998).

Karrou (2000) déclare que pour réduire les effets de la sécheresse, augmenter et stabiliser les rendements du blé dur en zones arides et semi-arides, il est indispensable de développer un matériel génétique ayant la capacité de remobiliser les assimilats des tiges vers les grains sous stress hydrique et d'avoir des taux de remplissage des grains élevés tout en maintenant des nombres de grains/épi acceptables et relativement stables (Karrou, 2000).

Le déficit hydrique réduit en général la profondeur maximale des racines, le volume total racinaire, le nombre total des racines et la matière sèche racinaire, chez le blé dur. Ainsi, sous conditions favorables d'alimentation en eau, il peut exister un équilibre entre les différents paramètres racinaires avec une tendance à l'allongement. Lorsque l'alimentation hydrique est limitante, l'accroissement en longueur des racines rompt cet équilibre (EL Fakhri *et al.*, 2010).



Les travaux de Bousba *et al.*, (2013) montrent que sur un ensemble de variétés expérimentées sous régime hydrique sévère (10% CC), une chute considérable et hautement significative ( $p < 0.01$ ) du taux de chlorophylle a été observée. La diminution de la teneur en chlorophylle chez des plantes stressées est considérée comme étant l'une des causes majeures de la réduction de la croissance et de la productivité. Il est reconnu que le manque d'eau induit une chute de la teneur en chlorophylle dans les feuilles. (Wang *et al.*, 1997 ; Guerfel *et al.*, 2009 ; Bousba *et al.*, 2009 ; Ghobadi *et al.*, 2011).

La teneur relative en eau (TRE) est un paramètre hautement influencée par le stress hydrique et qui décrit la capacité de la plante à se maintenir hydratée en conditions déficitaires (Bousba *et al.*, 2013). La carence hydrique provoque une déstabilisation des membranes plasmiques et donc la conductivité cellulaire, ce qui a pour conséquent une perte d'électrolytes à travers la membrane plasmique ce qui contribue à la perte de turgescence (Campos *et al.*, 2003).

Une valeur élevée de ce pourcentage traduit une forte fuite d'ions à travers les membranes donc des membranes instables, affectées par le stress. Des valeurs enregistrés montrent une augmentation de ce paramètre allant de 19.15% sous régime non déficitaire (100% CC) jusqu'au 40% sous un régime déficitaire (Bousba *et al.*, 2013).

L'étude de Ayed *et al.*, (2016) portant sur l'évaluation de l'adaptabilité et la stabilité de six génotypes de céréales en conditions pluviales et dans deux environnements semi-arides a montré qu'il existait des différences d'instabilité des performances entre les génotypes pour les traits testés et qui sont le nombre d'épis/m<sup>2</sup>, le nombre de plants/m<sup>2</sup>, le poids de mille grains et le nombre de grains/épi. L'interaction entre les génotypes et les environnements été hautement significative ( $p < 0,001$ ) pour tous les caractères précédemment cités, sauf le nombre de talles/plante.

Selon Benchohra et Khelloufi (2000), les réponses de la plante à la contrainte hydrique se font par des ajustements continus entre les disponibilités et les besoins en eau et sont variables selon le génotype, l'occurrence et l'intensité de la contrainte. Ces réponses à la sécheresse sont traduites par une forte régression des talles herbacées, une faible fertilité de l'épi, ou par la réduction du nombre de grains par épi et une dépression importante du rendement final.

*CHAPITRE -II-  
MATERIEL ET METHODES*

## CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

### 1. SITE, MATERIEL VEGETAL ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'étude du comportement de 15 variétés de blé dur (Tableau 2) a été menée sur trois campagnes agricoles 2012/2013, 2013/14 et 2014/2015, avec deux dates de semis par campagne à la Station Expérimentale Agricole de l'ITGC de Sétif (SEA-ITGC Sétif), donc les coordonnées géographiques sont 36° 9' N et 5° 21' E avec une altitude de 1081 m.

**Tableau 2.** Liste des 15 géotypes de blé dur évalués au cours des campagnes 2012/13, 2013/14 et 2014/15 sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif.

Nom	Pedigree	Croisement	Sélection
Massara	Mrb <sub>3</sub> /4/Bye*2/Tc/2/Zb/W/3/Cit	Cimmyt-Icarda	ITGC
Cyprus <sub>2</sub>	Gdovz <sub>512</sub> /Cit//Ruff/Fg/3/Ggovz <sub>449</sub>	Cimmyt-Icarda	ITGC
MBB	Variété locale	Population locale	ITGC
Waha	Plc/Ruff//Gta's/3/Rolette CM 17904	Cimmyt-Icarda	ITGC
Gta dur	Crane/4/PolonicumPI <sub>185309</sub> //T.glutin en/2* Tc60/3/Gll	Cimmyt-Icarda	ITGC
Vitron	Turkey77/3/Jori/Anhinga//Flamingo	Cimmyt-Icarda	ITGC
Bousselam	Heider/Martes//Huevos de Oro	Cimmyt-Icarda	ITGC
Massinissa	Ofanto/Bousselam	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Megress	Ofanto/Waha//MBB	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Setifis	Bousselam/Ofanto	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Mansoura	Chinese spring/MBB	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Tajdid	Ofanto/Bousselam's	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Moustakbel	Gta dur/Ofanto	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Boutaleb	Hedba/Ofanto	SEA-ITGC-Sét	ITGC
Sétif <sub>2013</sub>	Ofanto/Bousselam's	SEA-ITGC-Sét	ITGC

La zone appartient à l'étage bioclimatique semi-aride caractérisé par un climat continental typiquement méditerranéen. L'essentiel du cumul pluviométrique est enregistré au cours de la saison de l'hiver qui est froide. L'été est chaud et sec, alors que le printemps et l'automne sont brefs et peu marqués.

Le sol du site expérimental est de type brun calcaire, de la classe des sols bruns steppiques, qui se caractérise par un pH de 8.2 et un taux de matière organique de 1.35 %. Il a une composition de 13.9 % de sable, 41.3 % de limon et 44.7 % d'argile (Kribaa, 2002).

Le matériel végétal a été semé dans un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions, sur des parcelles élémentaires de 6 m<sup>2</sup> (6 rangs, 5 m de long et 0.20 m écartement entre rangs). La première date de semis est réalisée au mois de décembre et la seconde au mois de janvier. La densité de semis est de 300 graines au m<sup>2</sup>.

Les essais dont le précédent cultural est une légumineuse pour la première campagne et une jachère pour la seconde, sont fertilisés avec une fumure de fond, le MAP à 52% de phosphore, à raison de 80 kg/ha avant le semis. 100 kg/ha d'urée (35% N) sont épandus au stade tallage. Le contrôle des adventices est réalisé chimiquement avec l'herbicide Brumby 80 EC, appliqué au stade 2-3 feuilles contre les graminées adventices à raison de 0,75 l/ha et le Granstar 75 DF [*Methyl Tribenuron*] contre les adventices dicotylédones à raison de 12,5 g/ha.

## **2. MESURES ET NOTATIONS**

Les mesures et notations suivantes ont été réalisées par parcelle élémentaire.

### **2.1. NOMBRE DE PLANTS**

Le nombre de plants installés a été compté à la levée sur 3 stations de 1 m linéaire de long en diagonale de la parcelle élémentaire.

### **2.2. NOMBRE DE TALLES HERBACEES**

Le nombre de talles émises par plante a été déterminé au stade tallage, sur les mêmes stations qui ont servi à la détermination du nombre de plantes par unité de surface.

### **2.3. HAUTEUR DE LA VEGETATION**

La hauteur est prise du sol au sommet de l'épi, barbes non incluses, avec une ruban mètre.

#### **2.4. SURFACE FOLIAIRE**

La surface foliaire de la feuille étendard est déterminée par produit de la longueur par la plus grande largeur de la feuille étendard, mesurées sur un échantillon de 10 feuilles prises au hasard au stade épiaison par le coefficient de 0.704. Ce coefficient est rapporté par Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990), il représente le coefficient de régression de la surface foliaire déduite par le produit L x l sur celle déduite par la méthode planimétrique sur papier grammage :

$$SF \text{ (cm}^2\text{)} = 0.704 \times L \times l$$

Où SF = surface moyenne de la feuille étendard (cm<sup>2</sup>), L = longueur moyenne de la feuille étendard (cm), l = largeur moyenne de la feuille étendard (cm).

#### **2.5. LONGUEUR DU COL DE L'ÉPI**

La longueur du col est estimée par la longueur qui sépare le deux noued point d'attache de la feuille étendard et les base de l'épi, cm, à maturité.

#### **2.6. DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE**

La durée de la phase végétative est estimée en nombre de jours calendaires comptés à partir du 1<sup>er</sup> janvier à la date de sortie de 50% des épis par unités de surface ou par parcelle élémentaire.

#### **2.7. BIOMASSE AERIENNE**

La biomasse aérienne est déterminée au stade maturité à partir du poids des bottillons provenant de la récolte d'un ségment de rang de 1 m de long par parcelle élémentaire. Elle est exprimée en g/m<sup>2</sup>, sans passage à l'étuve.

## **2.8. NOMBRE ET POIDS DES EPIS**

Le nombre et le poids des épis produits par unité de surface sont déduits du comptage et pesage du nombre d'épis présent dans les bottillons de végétation récoltés à maturité. Ils sont exprimés, respectivement, en nombre d'épis/m<sup>2</sup> et en g/m<sup>2</sup>.

## **2.9. RENDEMENT GRAIN ET COMPOSANTES DU RENDEMENT**

Le rendement grain est déterminé par le poids des graines issues du battage des épis comptés par bottillon de végétation. Il est exprimé en g/m<sup>2</sup>. Les 250 graines sont comptées à partir du produit du battage des épis et pesées pour déterminer la composante du rendement qui est le poids de 1000 grains.

Le nombre de grains/ épi (NGE) et celui de graines produites par m<sup>2</sup> (NGM<sup>2</sup>) sont estimés par calcul direct à partir des estimations du rendement grain (RDT, g/m<sup>2</sup>), du poids de 1000 grains (PMG, g/1000 grains) et du nombre d'épis/m<sup>2</sup> (NE, nbre/m<sup>2</sup>) :

$$\text{NGE} = (1000 \text{ RDT}) / (\text{PMG} \times \text{NE})$$

et

$$\text{NGM}^2 = \text{NGE} \times \text{NE}$$

## **3. ANALYSE DES DONNEES**

Les données collectées sont soumises à une simple analyse de la variance (Anova) pour déterminer l'effet traitement (années x dates x géotypes) (Tableau 3). Lorsque l'effet traitement est significatif, les données sont ensuite soumises à une double analyse de la variance combinée qui sépare les effets années, date de semis, géotypes et leur interaction à deux et à trois voies, pour la première analyse et les effets environnements (dans le sens année x dates), géotypes et leur interaction dans la seconde analyse (Tableau 3 ; Annichiarico, 2002). La seconde analyse de la variance combinée est faite pour le rendement qui est ensuite analysé par les méthodes AMMI et GGE (Tableau 4).

**Tableau 3.** Squelette de l'analyse de la variance des données collectées à partir des expérimentations de 15 génotypes de blé dur conduites au cours de 3 années en deux dates de semis sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif ( Effets année, date de semis, génotype et interactions).

Source	dII	CME	F test
Traitement	89	M1	M1/M10
Répétition	2	M2	-----
Année (A)	2	M3	M3/M5
Date (D)	1	M4	M4/M5
A x D	2	M5	M5/M9
Génotype (G)	14	M6	M6/M9
A x G	28	M7	M7/M9
D x G	14	M8	M8/M9
A x D x G	28	M9	M9/M10
Erreur pondérée	178	M10	
Total	269		

**Tableau 4.** Squelette de l'analyse de la variance des données collectées à partir des expérimentations de 15 génotypes de blé dur conduites au cours de 3 années en deux dates de semis sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif (Effets environnement = combinaisons année x date de semis, génotype et interaction).

Source	dII	CME	F test
Traitement	89	M1	M1/M13
Environnement €	5	M2	M2/M7
Rép/E	12	M3	-----
Génotype (G)	14	M6	M6/M7
E x G	70	M7	M7/M13
Régression	14	M8	M8/M9
Déviation	56	M9	M9/M13
IPCA <sub>1</sub>	16	M10	M10/M12
IPCA <sub>2</sub>	14	M11	M11/M12
Déviation	12	M12	M12/M13
Erreur pondérée	112	M13	
Total	269		

Le modèle additif du dispositif à trois facteurs (année, date et génotype) est le suivant :

$$Y_{ijk r} = \mu + G_i + A_j + D_k + B_r(A_j, D_k) + G \times A_{ij} + G \times D_{ik} + A \times D_{ik} + A \times D \times G_{ijk} + e_{ijk r};$$



Où :

$Y_{ijk}$  = observation faite sur le génotype  $G_i$ , de l'année  $A_j$ , de la date  $D_k$  et du bloc

$B_{jkr}$  ;

$\mu$  = moyenne générale ;

$G_i$  = effet moyen génotype ;

$A_j$  = effet moyen année ;

$D_k$  = effet moyen date de semis ;

$B_r(A_j, D_k)$  = effet bloc hiérarchisés aux années x dates ;

$G \times A_{ij}$  = interaction année x génotypes ;

$G \times D_{ik}$  = interaction date x génotypes ;

$A \times D_{ik}$  = interaction année x dates ;

$A \times D \times G_{ijk}$  = interaction année x dates x génotypes et

$e_{ijk}$  = résiduelle pondérée.

Le modèle AMMI est le suivant, il combine les effets principaux génotype et environnement et l'effet multiplication de l'interaction. La valeur prise par la variable mesurée, chez un génotype donné (i) dans un environnement donné (j) est modélisée comme suit :

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \gamma_{ik} \alpha_{jk} + \rho_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Où :

$Y_{ij}$  : valeur prise par la variable mesurée chez le génotype  $i$  dans l'environnement  $j$ ,

$\mu$  : grande moyenne ou moyenne générale de la population des valeurs mesurées ;

$g_i$  : effet principal du génotype  $i$ ,

$e_j$  : effet principal de l'environnement  $j$ ,

$\lambda_k$  : valeur singulière de la composante principale  $k$ ,

$\gamma_{ik}$  : score du génotype  $i$  associé à la composante principale  $k$ ,

$\alpha_{jk}$  : score de l'environnement  $j$  associé à la composante principale  $k$ ,

$\rho_{ij}$  : résiduelle de l'interaction,

$\varepsilon_{ij}$  : résiduelle pondérée.

Le modèle GGE est le suivant, il modélise, selon Yan *et al.*, (2000), essentiellement l'effet génotype associé à l'interaction :

$$Y_{ij} - Y_{.j\bar{.}} = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

Où :

$Y_{ij}$  = valeur prise par la variable mesurée du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$ ,

$\bar{Y}_{.j}$  : moyenne des valeurs prises par la variable mesurée de l'ensemble des génotypes testés dans l'environnement  $j$ ,

$\lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1}$  : première composante principale (PCA1) ;

$\lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2}$  : deuxième composante principale (PCA2) ;

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$ : valeurs propres associées à la première et à la deuxième composantes principales, respectivement ;

$\xi_{i1}$  et  $\xi_{i2}$ : scores sur la première et la seconde composantes principales, du génotype  $i$ ,

$\eta_{j1}$  et  $\eta_{j2}$ : scores sur la première et la seconde composantes principales de l'environnement  $j$  ;

$\varepsilon_{ij}$ : résiduelle du modèle.

#### **4. ANALYSE DE LA STABILITE**

La stabilité a été approchée par le calcul de plusieurs indices dont certains mesurent la stabilité alors que d'autres mesurent la stabilité associée à la performance. Certains relèvent des méthodes paramétriques, alors que d'autres relèvent des méthodes non paramétriques (Rose *et al.*, 2008 ; Benmahammed *et al.*, 2010 ; Adjabi *et al.*, 2016).

##### **4.1. INDICES PARAMETRIQUES**

###### **4.1.1. MOYENNE GENOTYPIQUE ( $Y_i$ )**

La moyenne de rendement du génotype est calculée sur la base des valeurs des performances du génotype considéré sur l'ensemble des environnements testés :

$$Y_i = \sum Y_{ij} / n$$

Où  $Y_{ij}$  est la valeur moyenne du rendement mesurée par environnement (1...à... j) pour le génotype  $i$  (1... à... i).

###### **4.1.2. VARIANCE ENVIRONNEMENTALE ( $S_{env}^2$ )**

La variance environnementale ( $S_{env}^2$ ) est une des principales mesures de la stabilité phénotypique selon le concept statique (Lin *et al.*, 1986 ; Annicchiarico, 2002). Une

variance environnementale nulle ( $S_{env}^2=0$ ) est la caractéristique d'un génotype stable. Cette variance est calculée comme suit :

$$S^2i = \sum \frac{(Y_{ij} - Y_{i.})^2}{n - 1}$$

Où  $Y_{ij}$  = le rendement en grains du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$ ,  $Y_{i.}$  = est la moyenne des rendements du génotype  $i$  sur l'ensemble des environnements  $j$ ,  $n$  = nombre d'environnements tests.

#### **4.1.3. VARIANCE DE SHUKLA (1972)**

Shukla (1972) a introduit la variance de la stabilité phénotypique du génotype  $i$  ( $\sigma^2_i$ ). Elle est calculée sur la base des valeurs génotypiques observées par environnement, desquelles l'effet environnement est soustrait ( $Y_{ij}-Y_{.j}$ ).  $\sigma^2_i$  est estimée comme suit :

$$\sigma_i^2 = \left[ \frac{p}{(p-2)(q-1)} \right] W^2i - \frac{\sum W^2i}{(p-1)(p-2)(q-1)}$$

Où  $p$  = nombre de génotypes comparés ;  $q$  = nombre d'environnements tests,  $W_i$  = écovalence du génotype  $i$ ,  $\sum W_i$  = somme des écovalences des génotypes testés

#### **4.1.4. ÉCOVALENCE DE WRICKE (1962)**

L'écovalence ( $W_i$ ) de Wricke (1962) est calculée par la formule suivante :

$$W_i = \sum (Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..})^2$$

Où  $Y_{ij}$ ,  $Y_{i.}$ ,  $Y_{.j}$  et  $Y_{..}$  sont, respectivement, le rendement du génotype  $i$  dans l'environnement  $j$ , le rendement moyen du génotype  $i$  calculé sur l'ensemble des environnements testés, le rendement moyen de l'environnement  $j$  calculé sur

l'ensemble des géotypes évalués et la grande moyenne de rendement calculée sur l'ensemble des géotypes et environnements.

#### **4.1.5. INDICE P DE SUPERIORITE GENOTYPIQUE**

L'indice P de la supériorité génotypique de Lin *et al.*, (1988) est calculé par la formule suivante :

$$P_i = \left[ \sum (Y_{ij} - M_j) \right]^2 / 2n$$

Où  $Y_{ij}$  = rendement du géotype  $i$  dans l'environnement  $j$ ,  $M_j$  = rendement du géotype le plus performant dans l'environnement  $j$  et  $n$  = nombre d'environnements testés.

#### **4.1.6. LE COEFFICIENT DE VARIATION (CV%)**

La stabilité phénotypique peut être aussi mesurée par le coefficient de variation phénotypique comme le mentionnent (Francis et Kannenberg, 1978). Le coefficient de variation phénotypique est déduit comme suit, à partir de la variance environnementale et de la moyenne des rendements de l'ensemble des environnements du géotype  $i$  :

$$CV(\%) = 100 \left( \frac{\sqrt{S^2_i}}{Y_i} \right)$$

Où  $S^2_i$  = variance environnementale,  $Y_i$  = moyenne des rendements de l'ensemble des environnements tests du géotype  $i$ .

#### **4.1.7. INDICE DE STABILITE AMMI (ASV)**

Les scores d'un géotype sur les IPCA de l'AMMI sont indicateurs de la stabilité du géotype considéré. Les scores proches de zéro indiquent la stabilité à l'inverse des scores de valeurs absolues élevées qui indiquent l'instabilité (Schoeman, 2003).

Purchase *et al.*, (2000) préconisent l'AMMI Stability Value (ASV) comme indice pour évaluer la stabilité d'un génotype donné en utilisant l'information fourni par les scores de ce génotype le long des IPCA. Pour les deux premiers IPCA significatifs, l'ASV est déterminée comme suit :

$$ASV = \sqrt{\left[ \frac{SS_{IPCA1}}{SS_{IPCA2}} (IPCA1_{score}) \right]^2 + (IPCA2_{score})^2}$$

Où  $SS_{IPCA1} / SS_{IPCA2}$  = le ratio entre les sommes des carrés des écarts des IPCA1 et IPCA2 ,  $IPCA_{score}$  et  $IPCA2_{score}$  = les scores du génotype considéré le long des axes 1 et 2 de l'AMMI.

#### **4.1.8. INDICE DE STABILITE AMMI ( $D_i$ )**

L'indice de stabilité AMMI ( $D_i$ ) est estimé par la formule proposée par Zhang *et al.*, (1998). C'est la racine carrée de la somme des distances des vecteurs du génotype considéré à partir de l'origine des axes.

$$D_i = \sqrt{\sum_i^c Y_{is}^2}$$

Où  $c$  = nombre des IPCA significatifs,  $Y_{is}^2$  = les scores du rendement du génotype  $i$  le long des IPCA.

## **4.2. INDICES NON PARAMETRIQUES**

### **4.2.1. INDICE DE FOX ET *al.*, (1990)**

Les statistiques non paramétriques de Fox *et al.*, (1990) sont déduites du classement des performances génotypiques par environnement et sur l'ensemble des environnements. Les génotypes dont le classement est situé dans le premier tiers (classement de 1 à 5) sont les meilleurs (TOP), ceux dont le classement est situé dans le tiers médian (classement de 6 à 10) sont moyens (MID) et ceux formant le dernier tiers (classement de 11 à 15) sont médiocres (BOT).

#### 4.2.2. SOMME DES RANGS DE KANG

La stabilité a été aussi approchée par la méthode de la somme des classements (Srank) des rendements (Kang *et al.*, 1991). Dans cette méthode, les rendements de l'environnement  $j$  sont classés par ordre décroissant, le génotype dont le rendement est maximal prend le classement 1. Les valeurs de la variance de Shukla (1972) sont classées par ordre croissant. Le rang 1 est donné au génotype ayant la plus faible variance.  $S_{\text{rank}}$  est égale à la somme des rangs des rendements et de celui de la variance (Kang *et al.*, 1991 ; Rose *et al.*, 2008).

#### 4.2.3. INDICE DE STABILITE (StI)

L'indice de stabilité (StI) proposé par Rao *et al.*, (2004) est déterminé comme suit :

$$StI = \left( \frac{Y_{i.}}{Y_{..}} + \frac{1}{\sigma^2_i} \right) / \left[ \frac{1}{n} \sum_i \left( \frac{1}{\sigma^2_i} \right) \right]$$

Où  $Y_{i.}$  = Moyenne des performances du génotype  $i$  de l'ensemble des environnements tests,  $Y_{..}$  = la grande moyenne de l'ensemble des génotypes et environnements,  $\sigma^2_i$  = la variance de Shukla (Shukla, 1972) du génotype considéré,  $n$  = nombre d'environnements tests.

#### 4.2.4. BAJPAI'S INDICE DE STABILITE DU RENDEMENT

L'indice de stabilité du rendement de Bajpai (Bajpai et Prabhakaran, 2000), dénommé Bajpai's I est calculé comme suit :

$$Bajpai's I = \frac{Y_{i.}}{Y_{..}} + \Psi \left( \frac{\frac{1}{\sigma^2_i}}{\left[ \frac{1}{t \sum_i \frac{1}{\sigma^2_i}} \right]} \right)$$

Où  $Y_i$ ,  $Y_{..}$  = sont définis plus haut et  $\sigma^2_i$  = variance de Shukla (1972),  $\psi$  = poids donné au ratio qui suit ce signe dans la formule ci-dessus, il est égale à 0.25 ou 0.50 selon les auteurs de cet indice,  $t = n$  = nombre d'environnements.

#### **4.2.5. INDICE DE DURABILITE (SuI)**

L'indice de durabilité (SuI = sustainability index), proposé par Babarmanzoor *et al.*, (2009), est déterminé par la formule suivante :

$$SuI = \left[ \left( \frac{Y_i - \sigma_n}{YM} \right) \right] \times 100$$

Où  $Y_i$  = la moyenne des performances du génotype  $i$  de l'ensemble des environnements,  $\sigma_n$  = écart type de la variance environnementale du génotype considéré,  $YM$  = la moyenne des performances du génotype le plus performant parmi les variétés testées.

Les valeurs de l'indice SI sont arbitrairement classés en cinq groupes : très faible (jusqu'à 20%), faible (21% à 40%), modérée (41% à 60%), élevée (61% à 80%) et très élevée (supérieur à 80%), selon ses auteurs.

#### **4.2.6. RENDEMENT RELATIF**

Le rendement relatif comme mesure de la performance et de la stabilité a été introduit par Yau et Hamblin (1994). Pour ce faire le rendement du génotype dans un environnement donné est exprimé en pourcent de la moyenne des performances des différents génotypes dans cet environnement :

$$RY_{ij} = 100 \times \frac{Y_{ij}}{Y_{i.}}$$

Ensuite on détermine la moyenne des rendements relatifs des différents génotypes comme suit :



$$RY_i = \frac{\sum_j RY_{ij}}{n}$$

Où n= nombre d'environnements tests.

#### **4.2.7. INDICE DE STABILITE DU RENDEMENT (YSI)**

L'indice de stabilité du rendement en grains, proposé par Kang (1993) est déterminé comme suit :

$$YSI = RASV + RY$$

Où RASV = classement des valeurs de l'ASV (AMMI Stability Value), RY= classement des performances moyennes (Y<sub>i</sub>) des différents génotypes évalués. Les faibles valeurs de cet indice sont indicatrices de génotypes désirables associant performance et stabilité.

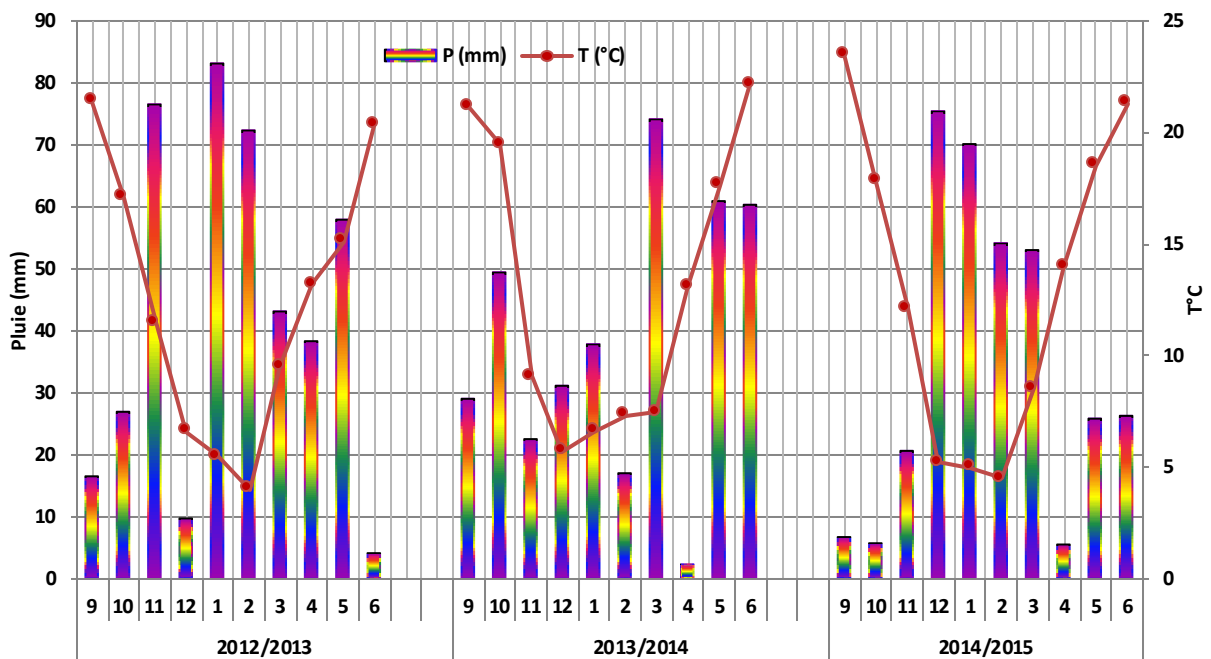
Les calculs statistiques ont été effectués avec les logiciels Cropstat 7.2.3. (2007), Past (Hammer et al., 2001), GGEbiplot version 0.6 et Excel (2007).

*CHAPITRE -III-  
RESULTATS ET DISCUSSION*

### CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 1. PLUIE ET TEMPERATURE DES CAMPAGNES D'ETUDE

Les trois campagnes de l'étude, 2012/13, 2013/14 et 2014/15, ont enregistré, respectivement, un cumul pluviométrique de 427.4 mm, 383.4 mm et 342.2 mm, du mois de septembre à juin (Figure 4). Du point de vu distribution mensuelle des précipitations, les trois campagnes sont très différentes. La campagne 2012/2013 se caractérise par les mois de septembre, octobre, décembre et juin dont le cumul pluviométrique mensuel est inférieur à 30 mm alors que les mois de novembre, janvier et février enregistrent un cumul mensuel supérieur à 70 mm (Figure 4).



**Figure 4.** Pluviométrie et température moyenne mensuelle du site ITGC de Sétif des trois campagnes d'études.

La campagne 2013/14 se caractérise, au contraire, par des mois de septembre, novembre, février et avril dont le cumul mensuel est inférieur à 30 mm, alors que seuls les mois de mars, mai et juin enregistrent un cumul pluviométrique de plus de 60 mm. Au cours de la campagne 2014/15, les mois de septembre, octobre, novembre, avril, mai et juin enregistrent un cumul pluviométrique inférieur à 30 mm

alors que les mois de décembre, janvier, février et mars enregistrent un cumul de plus de 50 mm (Figure 4).

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

A l'inverse du cumul pluviométrique, la température moyenne mensuelle présente une distribution bimodale, basse au cours des stades végétatifs, tallage, montaison, gonflement et élevée au cours de la floraison, remplissage du grain et la phase d'installation de la culture (semis - début tallage) (Figure 4). En effet la température moyenne mensuelle est au-dessous de 10°C au cours des mois allant de décembre à mars et s'élève rapidement au cours du reste des mois de l'année (Figure 4).

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

## **2. VARIABILITE PHENOTYPIQUE DES CARACTERES MESURES**

### **2.1. EFFET MOYEN ANNEE**

L'analyse de la variance des caractères mesurés indique des effets moyens et des interactions significatives pour l'ensemble des caractères analysés (Tableau 5). L'analyse de l'effet moyen année montre que les campagnes 2013, 2014 et 2015 diffèrent fortement pour l'expression de l'ensemble des caractères (Tableau 6). La

réduction des valeurs moyennes des variables mesurées varie de 20% à 80% des valeurs maximales observées au cours de la campagne 2013 (Figure 5).

Les réductions les plus importantes observées sont celles du rendement en grains, de la biomasse aérienne, du nombre de grains par m<sup>2</sup>, du poids des épis, du nombre de grains par épi, de la longueur du col, de la surface de la feuille étendard et de la hauteur de la végétation (Tableau 6, Figure 5).

**Tableau 5.** Valeurs du test F de l'analyse de la variance des caractères mesurés.

Source	Traitement	Rép	A	D	A x D	G	AxG	DxG	AxDxG	Erreur
dII	89	2	2	1	2	14	28	14	28	178
PLT	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	218.2
TH	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	1558.5
HT	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	2.9
SF	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	0.6
LC	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	0.7
PREC	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	0.1
BIO	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	2484.5
PE	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	324.8
NE	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	398.5
NGE	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	3.2
NGM	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	201816
PMG	**	*	**	**	**	**	**	**	**	27.3
RDT	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	36119

ns, \*, \*\* = effets non significatif et significatif aux seuils de 5% et de 1%, respectivement.

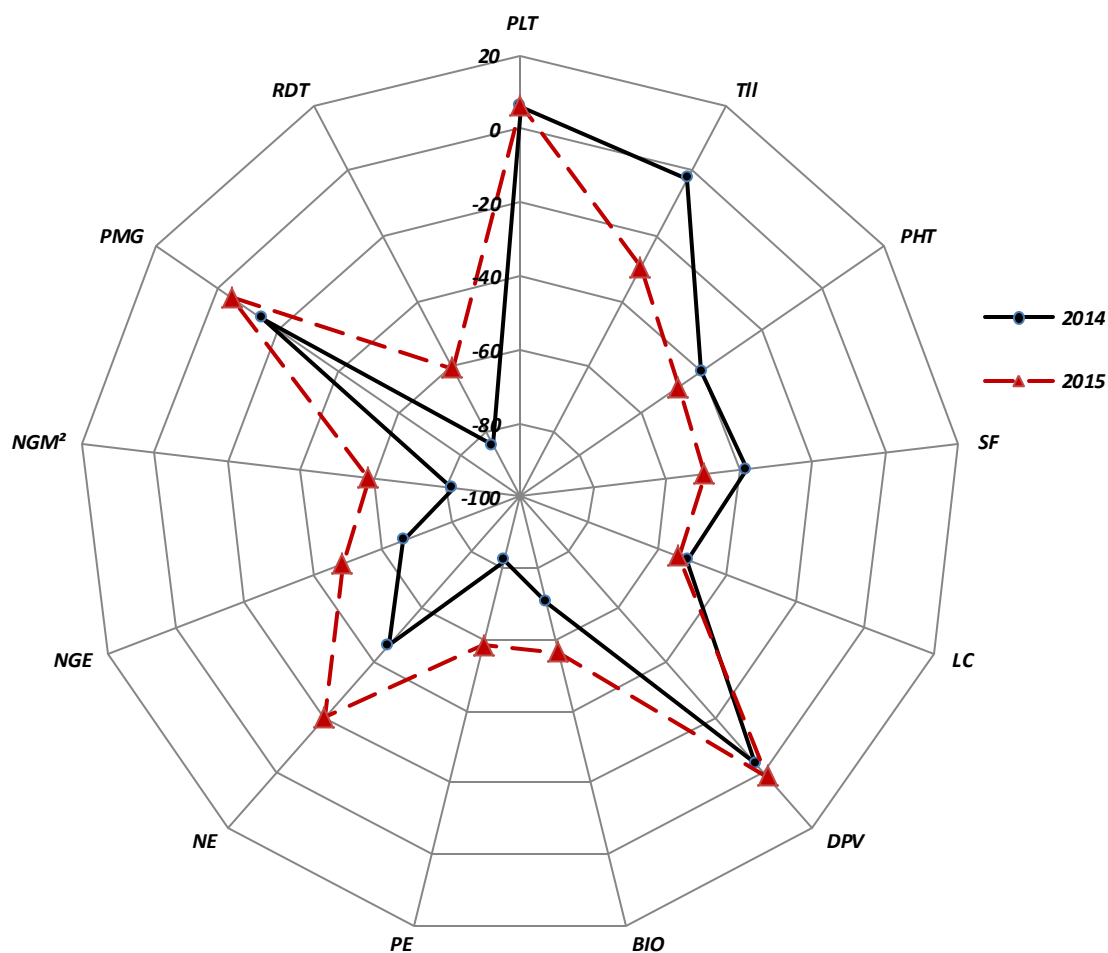
Ces résultats indiquent que ce n'est pas uniquement le rendement en grains qui est variable en fonction des campagnes mais également l'ensemble des caractères qui constituent l'architecture de la plante (Tableau 6). Ainsi le rendement en grains chute de 490.4 à 77.9 g/m<sup>2</sup>, soit une réduction de 84.1% en 2014 et de 60.7% en 2015.

Le nombre de grains par m<sup>2</sup> baisse de 11771.5 à 2181.0, soit une réduction de 81.5% en 2014 et de 58.6% en 2015. La biomasse chute de 1180.8 à 350.5 g/m<sup>2</sup>, soit une réduction de 70.2% en 2014 et de 56.4% en 2015 (Tableau 6, Figure 5).

**Tableau 6.** Valeurs moyennes des variables mesurées de l'effet année.

Année	PLT	TII	PHT	SF	LC	DPV	BIO	PE	NE	NGE	NGM <sup>2</sup>	PMG	RDT
2013	223.4	807.3	82.9	21.6	31.8	124.3	1180.8	710.4	389.1	30.7	11771.5	41.9	490.4
2014	236.7	788.1	49.7	13.4	15.5	120.1	350.5	125.7	210.4	10.4	2181.0	35.7	77.9
2015	237.3	569.2	43.4	10.9	14.6	126.1	515.2	296.2	311.1	15.9	4873.4	39.9	192.8
Ppds 5%	4.3	11.6	0.5	0.2	0.2	0.00	14.6	5.3	5.8	0.5	120.6	0.5	4.1

PLT= Plantes levées/m<sup>2</sup>; TII= talles herbacées/m<sup>2</sup>; PHT= hauteur de la plante, cm; SF= surface de la feuille étendard, cm<sup>2</sup>; LC= longueur du col de l'épi, cm; DPV= durée de la phase végétative, jours; BIO= biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m<sup>2</sup>; PE= Poids de épis/m<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup>; NE= Nombre d'épis par m<sup>2</sup>; NGE= Nombre de grains par épi; NGM<sup>2</sup>= Nombre de grains par m<sup>2</sup>; PMG= Poids de 1000 grains, g; RDT= Rendement en grains, g/m<sup>2</sup>.



**Figure 5.** Réduction des valeurs moyennes des variables mesurées des campagnes 2014 et 2015 comparativement à celles de 2013 (PLT= Plantes levées/m<sup>2</sup>; TII= talles herbacées/m<sup>2</sup>; PHT= hauteur de la plante, cm; SF= surface de la feuille étendard, cm<sup>2</sup>; LC= longueur du col de l'épi, cm; DPV= durée de la phase végétative, jours; BIO= biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m<sup>2</sup>; PE= Poids de épis/m<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup>; NE= Nombre d'épis par m<sup>2</sup>; NGE= Nombre de grains par épi; NGM<sup>2</sup>= Nombre de grains par m<sup>2</sup>; PMG= Poids de 1000 grains, g; RDT= Rendement en grains, g/m<sup>2</sup>).

Par contre le nombre de plantes levées montre une variation de l'ordre de 6.0%, alors que le nombre de talles varie de 807.3 à 569.2 talles par m<sup>2</sup> entre 2013 et 2015. Ces valeurs moyennes restent largement supérieures aux valeurs moyennes des talles

montantes en épis par m<sup>2</sup> qui varient de 389.1 à 210.4 épis /m<sup>2</sup>, soit des réductions de 45.9% en 2014 et 20.0% en 2015 ( Tableau 6, Figure 5).

Du point de vu sélection, il est difficile de prédire les performances permises par une année donnée, de ce fait, on ignore cette variation d'origine temporelle, tout en cherchant le génotype performant et qui soit le moins sensible possible à cette variation. L'effet du climat semble venir de la sécheresse, très sévère des mois d'avril 2014 et 2015, associé à une élévation de la température ambiante, notamment celle des mois d'avril, mai et juin 2015 (Figure 4).

## **2.2. EFFET MOYEN GENOTYPE**

Les moyennes des variables mesurées, calculées sur l'ensemble des dates et années, montrent une importante variabilité. Ainsi la moyenne du nombre de plants levés est de 232.5 avec un maxima de 264.5 et un manima de 206.0 plants/m<sup>2</sup>. Le nombre de talles herbacées varie de 851.3 à 624.3, avec une moyenne de 721.5 talles/m<sup>2</sup>. La hauteur de la végétation varie de 76.1 à 51.6, avec une moyenne de 58.9 cm.

La surface de la feuille étendard varie de 19.5 à 12.5, avec une moyenne de 15.3 cm<sup>2</sup>. La longueur du col de l'épi varie de 25.5 à 18.8, avec une moyenne de 20.6 cm. La durée de la phase végétative varie de 131.3 à 119.2, avec une moyenne de 123.5 jours. La biomasse accumulée à maturité varie de 955.1 à 576.3, avec une moyenne de 682.2 g/m<sup>2</sup>. Le poids des épis varie de 450.6 à 306.1, avec une moyenne de 377.4g /m<sup>2</sup>. Le nombre d'épis varie de 335.0 à 265.5, avec une moyenne de 303.5 épis/m<sup>2</sup>. Le nombre de grains par épi varie de 23.1 à 14.2, avec une moyenne de 19.0 grains/épi.

Le nombre de grains par m<sup>2</sup> varie de 7856.1 à 5255.8, avec une moyenne de 6275.3 grains/m<sup>2</sup>. Le poids de 1000 grains varie de 44.6 à 35.4, avec une moyenne de 39.2 g, et le rendement en grains varie de 304.2 à 202.8 avec une moyenne de 253.7 g/m<sup>2</sup> (Tableau 7). L'analyse de l'amplitude, qui est la différence entre les valeurs moyennes

maximales et les valeurs moyennes minimales, exprimée en % de la moyenne de chaque caractère, montre les possibilités de sélection au sein de l'échantillon de variétés étudiées (Figure 6).

**Tableau 7.** Valeurs moyennes des variables mesurées dues à l'effet génotype.

Geno	PLT	Tll	PHT	SF	LC	DPV	BIO	PE	NE	NGE	NGM <sup>2</sup>	PMG	RDT
Mas	235.7	851.3	60.1	14.3	23.2	119.2	645.8	418.2	328.9	22.0	7522.7	37.0	292.4
Sét <sub>13</sub>	206.0	624.8	76.1	12.5	25.5	131.3	955.1	430.5	299.8	22.3	6943.1	38.0	274.1
Cyp <sub>2</sub>	217.9	657.5	54.6	19.5	20.1	122.5	576.3	306.1	282.1	19.8	5542.8	37.9	217.1
Mbb	255.9	727.8	75.2	15.5	22.9	129.5	762.3	315.9	326.1	16.5	5681.8	35.7	214.0
Wah	219.4	624.3	56.3	14.7	20.4	122.0	595.5	349.6	281.4	20.6	6438.8	36.9	238.1
Gta	220.0	785.0	55.1	18.1	19.9	122.3	697.3	370.5	315.6	18.7	6508.0	37.9	256.1
Vit	208.4	749.2	54.5	15.9	19.6	120.7	661.6	396.5	301.7	20.6	6788.2	37.4	266.3
Meg	264.5	733.5	54.0	15.3	19.6	120.3	704.0	380.5	329.6	16.7	5943.0	42.9	253.4
Set	255.6	797.8	55.7	13.0	19.4	123.5	763.5	450.6	309.3	23.1	7856.1	37.9	304.2
Bou	221.1	737.5	56.3	14.5	18.8	124.3	707.4	412.7	310.9	18.1	6799.4	42.5	292.4
Man	257.9	790.6	55.1	13.0	21.3	124.3	626.9	360.2	335.0	14.2	5849.0	39.0	229.5
Mai	238.1	648.1	57.5	17.0	20.0	120.5	611.9	364.5	265.5	21.1	5905.0	41.3	253.2
Tjd	238.5	677.4	51.5	14.4	20.0	126.3	604.1	326.4	276.6	17.3	5255.8	35.4	202.8
Mou	235.6	682.2	55.2	16.5	19.5	121.5	638.0	355.6	288.4	16.6	5354.7	43.3	244.5
Bta	212.5	736.1	62.6	15.2	19.3	123.8	683.2	423.6	302.1	17.5	5740.8	44.6	267.8
MG	232.5	721.5	58.6	15.3	20.6	123.5	682.2	377.4	303.5	19.0	6275.3	39.2	253.7
Maxi	264.5	851.3	76.1	19.5	25.5	131.3	955.1	450.6	335.0	23.1	7856.1	44.6	304.2
mini	206.0	624.3	51.5	12.5	18.8	119.2	576.3	306.1	265.5	14.2	5255.8	35.4	202.8
Range	58.6	226.9	24.6	7.0	6.8	12.2	378.8	144.6	69.5	8.9	2600.4	9.1	101.4
Ppds5%	9.7	25.9	1.1	0.5	0.5	0.0	32.6	11.8	13.1	1.2	269.7	1.1	9.2

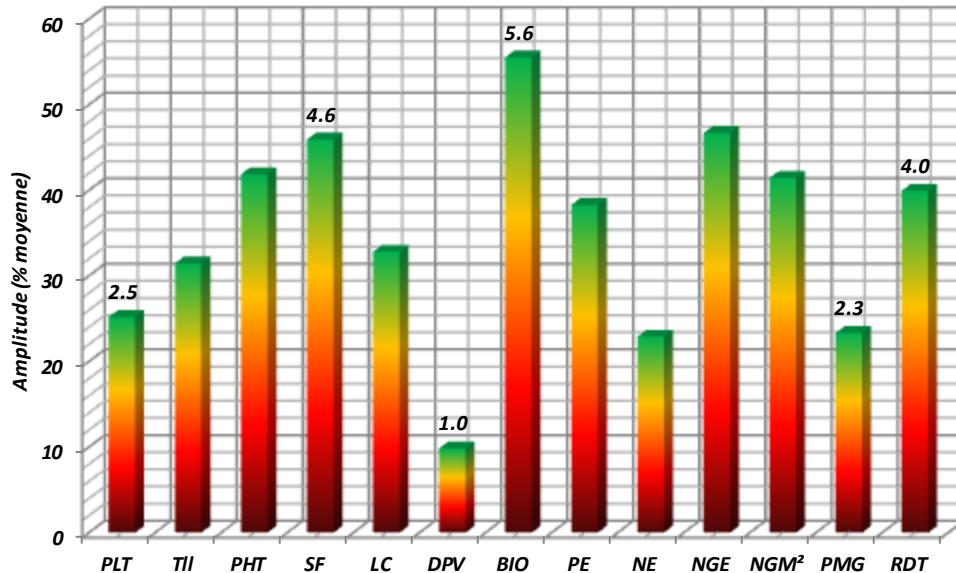
Mas= Massara, Set<sub>13</sub>= Sétif<sub>2013</sub>, Cyp<sub>2</sub>= Cyprus<sub>2</sub>, Mbb= Mohammed Ben Bachir, Wah= Waha, Gta= Gaviota durum, Vit= Vitron, Meg = Megress, Set= Setifis, Bou= Bousselam, Man= Mansoura, Mai= Massinissa, Tjd= Tajdid, Mou= Moustakbel, Bta= Boutaleb

Ainsi, en moyenne de l'ensemble des années et dates de semis évaluées, il est possible de réduire de la durée de la phase végétative de 10% de la moyenne générale de cette variable, comme il est aussi possible d'améliorer la biomasse aérienne de 56% et le rendement en grains de 40% de la moyenne générale de cette variable (Figure 6, Tableau 7).

Ces différences entre génotypes représentent la moyenne des différences de réponses aux années et dates de semis, qui ne sont pas toujours constantes suite à la présence de l'interaction des génotypes avec les dates et les années, comme il est indiqué par l'analyse de la variance des différents caractères (Tableau 5). Cependant



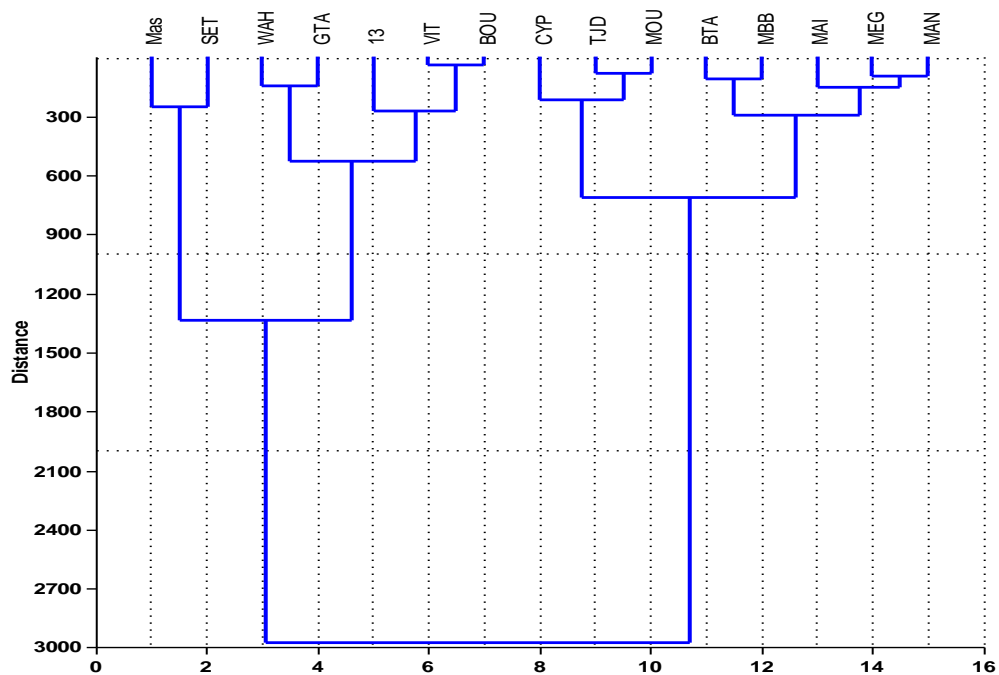
cet effet moyen génotype indique que les variétés les plus hautes sont Sétif<sub>2013</sub> et MBB.



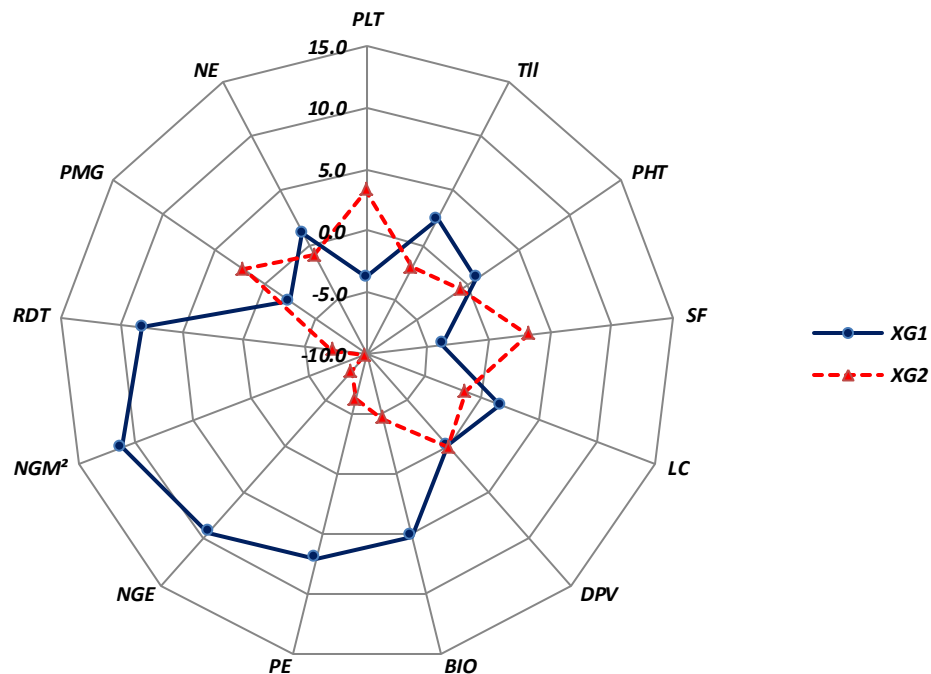
**Figure 6.** Amplitude, exprimée en % de la moyenne de l'ensemble des variétés, des variables mesurées (PLT= Plantes levées/m<sup>2</sup>; TII= talles herbacées/m<sup>2</sup>; PHT = hauteur de la plante, cm; SF= surface de la feuille étendard, cm<sup>2</sup>; LC= longueur du col de l'épi, cm; DPV= durée de la phase végétative, jours; BIO=biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m<sup>2</sup>; PE= Poids de épis/m<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup>; NE= Nombre d'épis par m<sup>2</sup>; NGE= Nombre de grains par épi; NGM<sup>2</sup>= Nombre de grains par m<sup>2</sup>; PMG= Poids de 1000 grains, g; RDT= Rendement en grains, g/m<sup>2</sup>).

Cyprus<sub>2</sub> présente la feuille étendard aux larges dimensions. Sétif<sub>2013</sub>, en plus de sa haute taille, présente aussi les valeurs les plus élevées pour la longueur du col, la durée de la phase végétative et la biomasse aérienne mesurée à maturité. Par contre Setifis présente les valeurs, les plus élevées, pour le poids des épis, les nombres de grains par épi et par m<sup>2</sup> et le rendement en grains (Tableau 7).

En moyenne des dates et des années, les génotypes évalués se classent en deux groupes qui sont constitués des génotypes Massara, Waha, Setifis, Gaviota durum, Sétif<sub>2013</sub>, Vitron et Bouselam pour le groupe 1 et Cyprus<sub>2</sub>, MBB, Megress, Mansoura, Massinissa, Tajdid, Moustakbel et Boutaleb pour le groupe 2 (Figure 7). Ces deux groupes diffèrent essentiellement pour le rendement en grains, les nombres de grains par épi et par m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne et le poids des épis, qui sont à l'avantage du groupe 1 (Figure 8).



**Figure 7.** Groupage des génotypes évalués sur la base des moyennes de l'ensemble des dates et années étudiées (Mas= Massara, Set13= Sétif2013 ,Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Boussemel, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 8.** Différences relatives entre les deux groupes de génotypes évalués classés sur la base des moyennes des variables mesurées de l'ensemble des dates et années étudiées (X<sub>G1</sub>= Massara, Waha, Setifis, Gaviota durum, Sétif<sub>2013</sub>, Vitron et Boussemel; X<sub>G2</sub>= Cyprus2, MBB, Megress, Mansoura, Massinissa, Tajdid, Moustakbel et Boutaleb; PLT= Plantes levées/m²; TII= talles herbacées/m²; PHT= hauteur de la plante, cm; SF= surface de la feuille étendard, cm²; LC= longueur du col de l'épi, cm; DPV= durée de la phase végétative, jours; BIO= biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m²; PE= Poids de épis/m², g/m²; NGE= Nombre d'épis par m²; NGE= Nombre de grains par épi; NGM²= Nombre de grains par m²; PMG= Poids de 1000 grains, g; RDT= Rendement en grains, g/m²).

Les différences pour le nombre de plants levés, la capacité de tallage herbacée, la hauteur de la végétation, le col de l'épi et la surface de la feuille étandard ne semblent pas être déterminantes dans la réalisation d'une biomasse aérienne ni d'un rendement en grains élevés de l'échantillon des variétés évaluées.

### 2.3. EFFET MOYEN DATE DE SEMIS

En moyenne des 15 génotypes et des trois années d'études, le semis précoce présente un avantage significatif comparativement au semis tardif pour presque l'ensemble des variables mesurées (Tableau 8). En effet, le semis précoce se distingue par une épiaison plus précoce de 6.4 jours, en moyenne. Ceci présente l'avantage de soustraire une partie du cycle de la plante aux effets pénalisants des stress abiotiques de fin de cycle de la culture, tels que le déficit hydrique et les hautes températures. Le semis précoce présente aussi certains avantages pour d'autres caractères (Tableau 8).

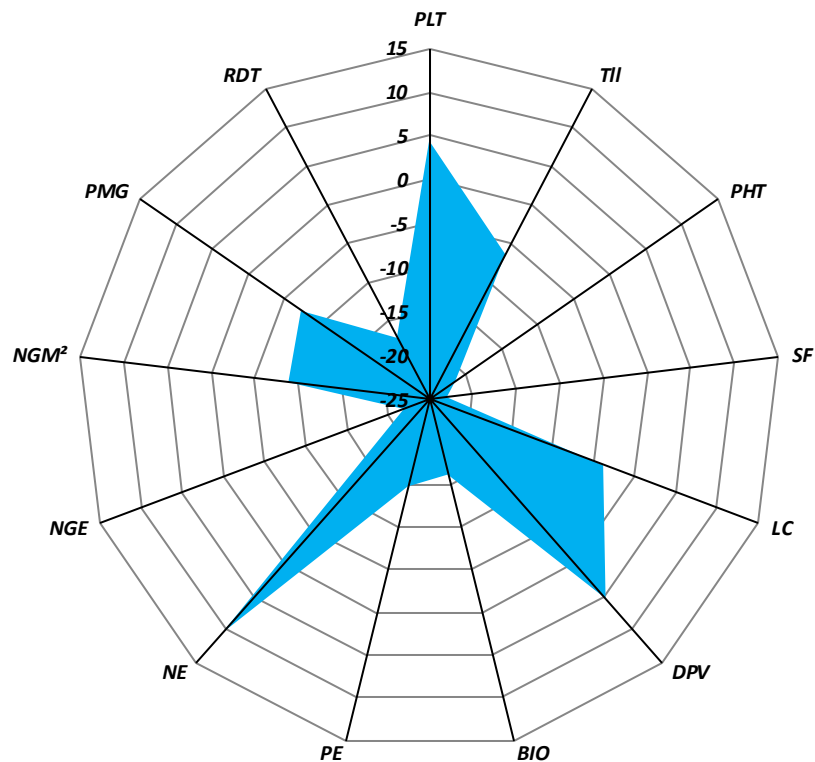
**Tableau 8.** Valeurs moyennes des variables mesurées de l'effet date de semis (moyenne des 15 génotypes et trois années).

DATE	PLT	TII	PHT	SF	LC	DPV	BIO	PE	NE	NGE	NGM <sup>2</sup>	PMG	RDT
D1	227.4	745.1	65.7	17.3	21.0	120.3	742.2	407.5	288.3	21.3	6565.7	40.7	277.4
D2	237.5	697.9	51.6	13.3	20.2	126.7	622.2	347.3	318.8	16.7	5984.9	37.7	230.0
amplitude	-10.1	47.2	14.1	4	0.8	-6.4	120	60.2	-30.5	4.6	580.8	3	47.4
Ppds5%	3.5	9.5	0.4	0.2	0.2	0.0	11.9	4.3	4.8	0.4	98.5	0.4	3.4

(PLT= Plantes levées/m<sup>2</sup>; TII= talles herbacées/m<sup>2</sup>; PHT= hauteur de la plante, cm; SF= surface de la feuille étandard, cm<sup>2</sup>; LC= longueur du col de l'épi, cm; DPV= durée de la phase végétative, jours; BIO= biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m<sup>2</sup>; PE= Poids de épis/m<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup>; NE= Nombre d'épis par m<sup>2</sup>; NGE= Nombre de grains par épi; NGM<sup>2</sup>= Nombre de grains par m<sup>2</sup>; PMG= Poids de 1000 grains, g; RDT= Rendement en grains, g/m<sup>2</sup>).

Ainsi les écarts moyens, entre dates de semis, de la hauteur de la végétation (+14.1 cm), du tallage herbacé (+47.2 talles/m<sup>2</sup>), de la biomasse aérienne (+120.0 g/m<sup>2</sup>), du poids des épis (+60.2 g/m<sup>2</sup>), du nombre de grains par épi (+4.6 grains par épi), du nombre de grains par m<sup>2</sup> (+580.8 grains/m<sup>2</sup>), du poids de 1000 grains (+3.0 g) et du rendement en grains (+47.4 g/m<sup>2</sup>) sont à l'avantage du semis précoce, en moyenne des trois années et des 15 génotypes. L'effet date de semis n'est pas significatif pour la longueur du col. Le nombre de plants levés et le nombre d'épis/m<sup>2</sup> sont à l'avantage du semis tardif (Tableau 8, Figure 9).

Le nombre d'épis augmente de 10.6%. Il est probable dans ce cas, que les pluies tardives, notamment celles observées au cours des campagnes 2014 et 2015, ont favorisé la montée en épis des tardillons qui ne contribuent pas réellement au rendement en grains, mais constituent une gêne pour la récolte.



**Figure 9.** Réduction des valeurs moyennes des variables mesurées de la date tardive comparativement à la date précoce (moyennes de trois années et des 15 génotypes), (PLT= Plantes levées/m<sup>2</sup> ; TII= talles herbacées/m<sup>2</sup> ; PHT= hauteur de la plante, cm ; SF= surface de la feuille étendard, cm<sup>2</sup> ; LC= longueur du col de l'épi, cm ; DPV= durée de la phase végétative, jours ; BIO= biomasse aérienne mesurée à maturité, g/m<sup>2</sup> ; PE= Poids de épis/m<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup> ; NE= Nombre d'épis par m<sup>2</sup> ; NGE= Nombre de grains par épi ; NGM<sup>2</sup>= Nombre de grains par m<sup>2</sup> ; PMG= Poids de 1000 grains, g ; RDT= Rendement en grains, g/m<sup>2</sup>).

Le nombre de plants s'améliore de 4.5% en semis tardif, ceci s'explique par le fait que le sol est plus humide lors du semis tardif, suite aux avènements pluvieux qui sont plus fréquents qu'en semis précoce. Ces résultats suggèrent que le semis précoce favorise une meilleure expression des caractères qui sont, le plus souvent, les déterminants du rendement en grains, comparativement au semis tardif. Par conséquent l'expression des performances du génotype serait plus importante en

semis précoce qu'en semis tardif, vu que les conditions de croissance sont, souvent, plus favorables en semis précoce qu'en semis tardif

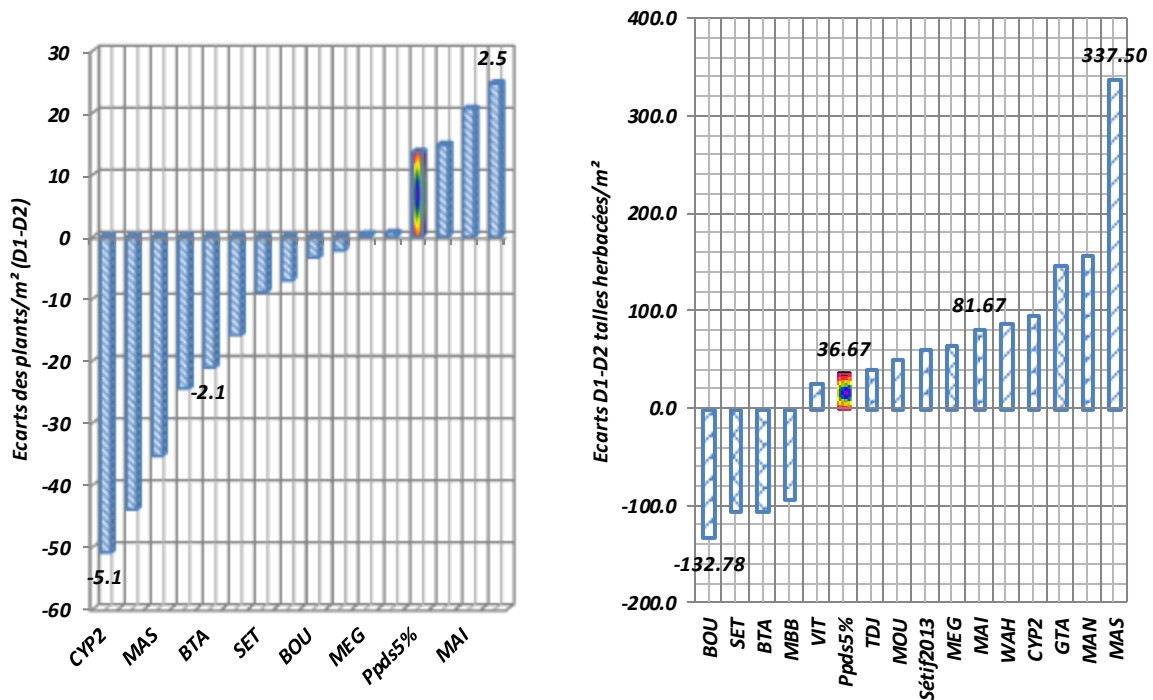
#### **2.4. INTERACTION GENOTYPE X DATES DE SEMIS**

En moyennes des trois années d'étude, l'interaction génotype x dates de semis indique que, pour le nombre de plants levés par unité de surface de sol semée, 6 variétés (Massara, Cyprus<sub>2</sub>, Gaviota durum, Mohammed Ben Bachir, Boutaleb, et Mansoura), sur 15 réduisent le nombre de plants installés en semis précoce plus qu'en semis tardif, avec des écarts variant de -15.9 à -50.9 plants/m<sup>2</sup> (Figure 10).

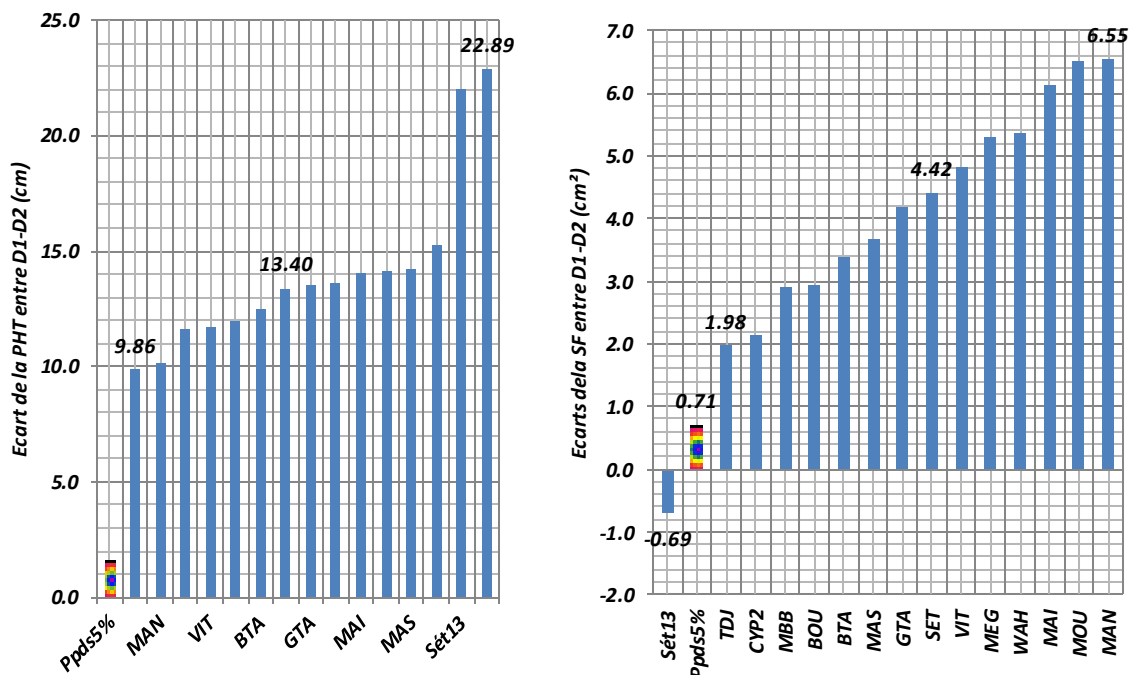
Six variétés, Waha, Megress, Setifis, Bousselam, Tajdid et Moustakbel, sur 15 ne présentent pas d'écarts significatifs pour cette variable, entre dates de semis. Par contre les variétés Sétif<sub>2013</sub>, Vitron et Massinissa réussissent une meilleure installation en semis précoce qu'en semis tardif, avec des écarts variants de +14.8 à +24.7 plants/m<sup>2</sup>. Globalement l'essentiel des variétés testées (12/15) s'installe mieux en semis tardif qu'en semis précoce ou ne répondent pas à la date de semis pour cette caractéristique.

En moyenne des trois campagnes agricoles, la capacité de tallage herbacée s'exprime mieux, chez 11 variétés sur 15, en semis précoce qu'en semis tardif, à l'exception des 4 variétés : Bousselam, Setifis, Boutaleb et MBB, qui ont tendance à produire plus de talles herbacées en semis tardif qu'en semis précoce (Figure 10).

Les écarts entre les valeurs moyennes de la hauteur de la végétation, la surface de la feuille étendard, la longueur du col de l'épi et la durée de la phase végétative, prises par les différentes variétés en semis précoce et en semis tardifs sont indiquées en figures 11 et 12. La hauteur des plantes est nettement plus élevée en semis précoce qu'en semis tardif pour l'ensemble des variétés. Les gains en hauteur varient de 9.9 cm chez Moustakbel à 22.9 cm chez MBB suivie de Sétif<sub>2013</sub> (Figure 11).



**Figure 10.** Ecarts du nombre de plants/m<sup>2</sup> (PLT) et du nombre de talles herbacées par m<sup>2</sup> (TLL) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 11.** Ecarts de la hauteur de la plante (PHT) et de la surface de la feuille étendard (SF) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

La réponse de la surface de la feuille étendard est similaire à celle de la hauteur de la végétation. En effet l'ensemble des variétés étudiées présentent une surface de la feuille étendard plus élevée en semis précoce qu'en semis tardif.

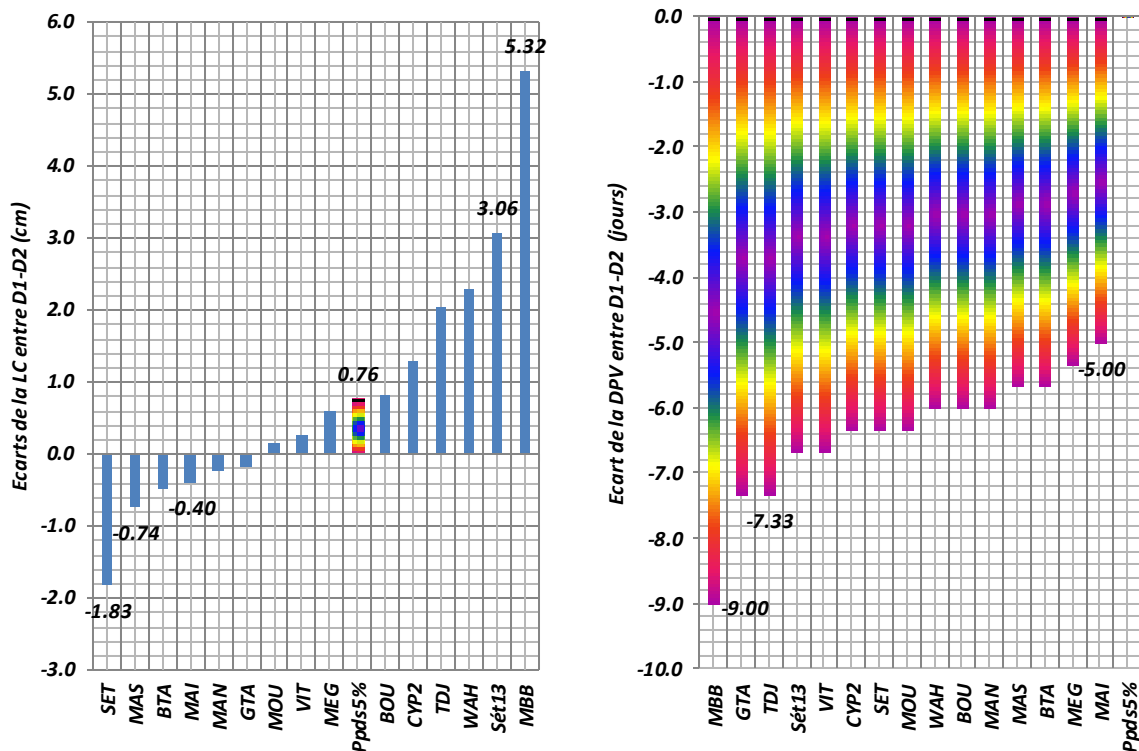
L'amélioration de la surface de la feuille varie d'un minimum de 2.0 cm<sup>2</sup> chez Tajdid à un maximum de 6.6 cm<sup>2</sup> chez Mansoura (Figure 11). La réponse de la longueur du col de l'épi, à la date de semis, au sein de l'échantillon des variétés étudiées est assez variable.

La variété Setifis, présente un col de l'épi qui est plus long, de 1.8 cm, en semis tardif. Alors que certains génotypes présentent un col de l'épi dont la longueur ne diffère pas significativement entre semis précoce et tardif. Ceci est le cas de Massara, Boutaleb, Massinissa, Mansoura, Gaviota durum, Moustakbel, Vitron, Megress et Bousselam.

Le col de l'épi des variétés Cyprus<sub>2</sub>, Tajdid, Waha, Sétif<sub>2013</sub> et Mohammed Ben Bachir, est, par contre, plus long en semis précoce, avec des écarts de 1.2 à 5.3 cm (Figure 12). La durée de la phase végétative est plus longue en semis tardif qu'en semis précoce. Les écarts entre dates de semis sont variables selon les génotypes, allant de 5.0 jours, chez Massinissa, à 9.0 jours, pour MBB (Figure 12).

Un décalage de la date d'épiaison et donc de la date de maturité physiologique fait courir plus de risques, aux génotypes, de subir les effets des contraintes de fin de cycle et donc de présenter des performances plus réduites et variables.

L'analyse des écarts de la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et par m<sup>2</sup> ainsi que le poids de 1000 grains, caractères qui montrent, le plus souvent, des liaisons assez importantes avec le rendement en grains indique des réponses génotypiques variables ( Figures 13, 14 et 15).



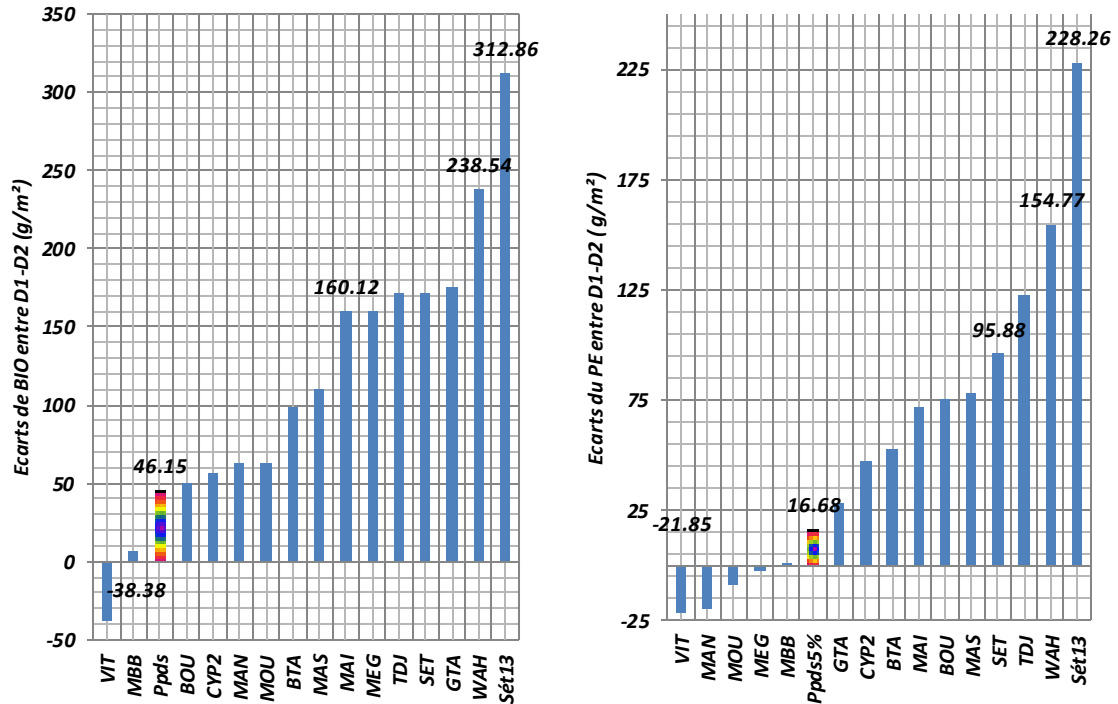
**Figure 12.** Ecart de la longueur du col (LC) et de la durée de la phase végétative (DPV) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013 ,Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Boussemam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Ainsi, pour la biomasse aérienne, le cultivar Vitron semble s’adapter au semis tardif, le cultivar MBB ne montre pas d’effet significatif de la date de semis pour ce caractère, alors que les autres variétés montrent une meilleure expression de la biomasse aérienne en semis précoce plus qu’en semis tardif (Figure 13).

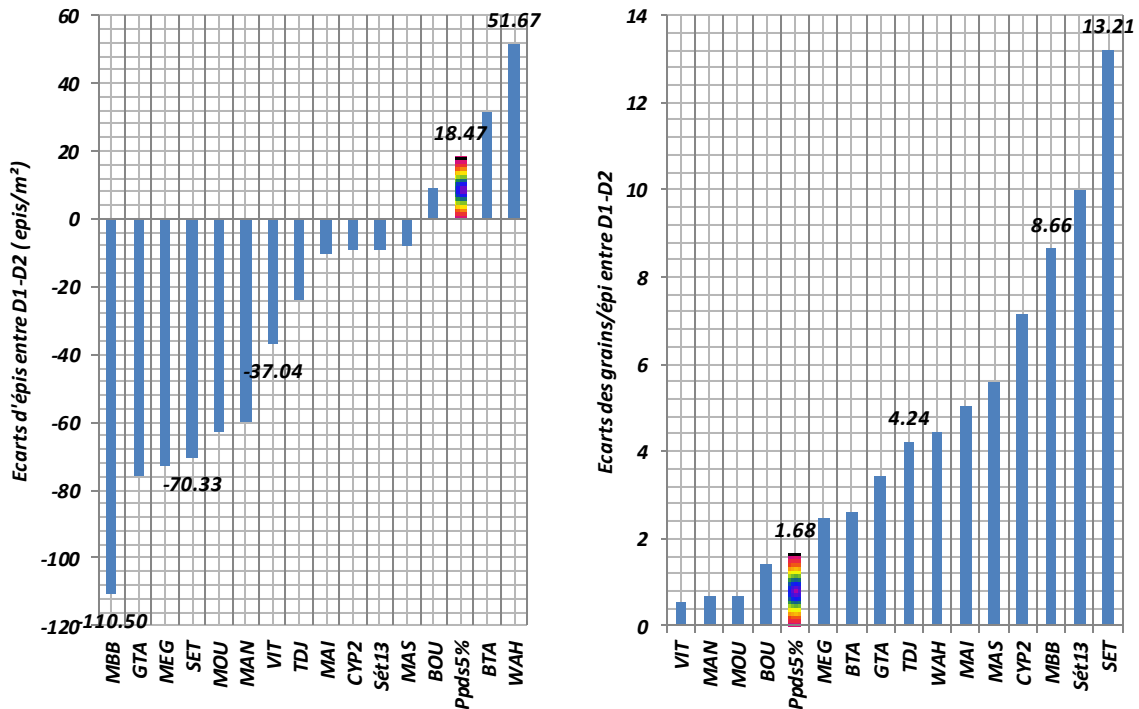
Le degré d’adaptation à une date de semis plus qu’à une autre est indiqué par la valeur de l’écart de la biomasse produite entre les deux dates (Figure 13). Ainsi les écarts, les plus élevés en valeurs, sont exprimés par les variétés Waha et Sétif<sub>2013</sub> et à un degré moindre par les génotypes Massinissa, Megress, Tajdid, Setifis, et Gaviota durum.

Ces résultats indiquent que les conditions de croissance des semis précoces sont plus favorables à une meilleure expression de la biomasse que celles qui prévalent lors des semis tardifs. Cependant seule la variété Vitron produit plus de biomasse en semis tardifs qu’en semis précoces.





**Figure 13.** Ecarts de la biomasse (BIO) et du poids des épis (PE) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 14.** Ecarts du nombre d'épi/m<sup>2</sup> (NE) et du nombre de grains par épi (NGE) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

La même réponse à la date de semis est exprimée par le poids des épis (Figure 13), le nombre de grains par épi (Figure 14) et le poids de 1000 grains (Figure 15). En effet l'ensemble des génotypes évalués s'adapte, à des degrés divers, vu les différences des écarts entre dates pour les variables mesurées, au semis précoce plus qu'au semis tardif.

Ainsi pour le poids des épis, les variétés qui s'expriment mieux en semis précoce sont Sétif<sub>2013</sub>, Waha, et à un degré moindre Tajdid, avec des écarts de 228, 155 et 125 g/m<sup>2</sup> de plus (Figure 13). Les génotypes comme Vitron, Mansoura, Moustakbel et MBB présentent un poids des épis qui varie peu en fonction des dates de semis, vu que les écarts de poids des épis ne sont pas significatifs (Figure 13).

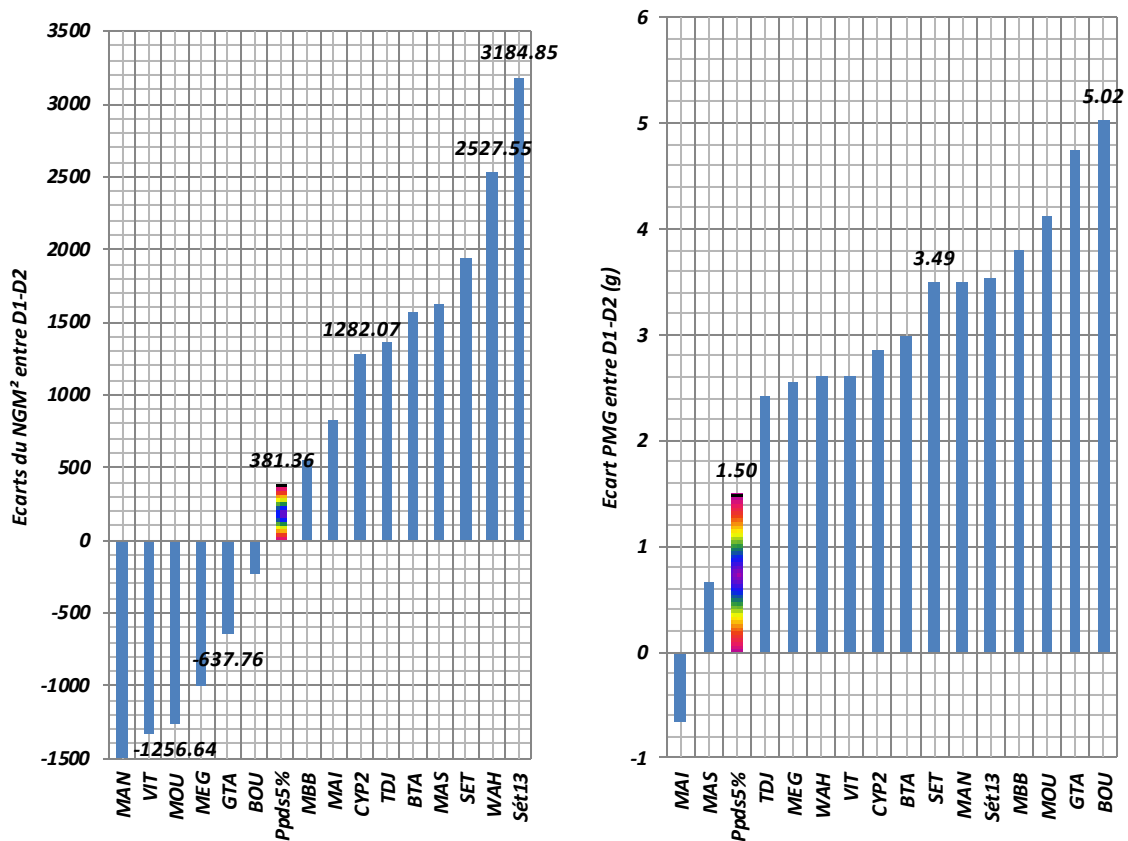
Pour le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains, la plupart des variétés évaluées présentent une meilleure expression de ces variables en semis précoce qu'en semis tardif. Setifis, Sétif<sub>2013</sub>, MBB et Cyrus<sub>2</sub> produisent un nombre de grains par épi largement plus élevé en semis précoce, alors que Vitron, Mansoura et Moustakbel ainsi que Bouselam ne semblent pas sensibles à la variation de la date de semis (Figure 14).

Pour le poids des 1000 grains, Massinissa et Massara répondent peu à la date de semis alors que Bouselam, Gaviota durum, et Moustakbel répondent significativement, avec un gain maximum de l'ordre de 5.0 g/1000 grains (Figure 15). A l'inverse de ces caractères, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le nombre de grains /m<sup>2</sup>, présente une grande variabilité des réponses des génotypes aux dates de semis (Figures 14 et 15). Waha et Boutaleb produisent plus d'épis/m<sup>2</sup>, en semis précoce. Bouselam, Massara, Sétif<sub>2013</sub>, Cyprus<sub>2</sub> et Massinissa se montrent peu sensibles à la variation de la date de semis.

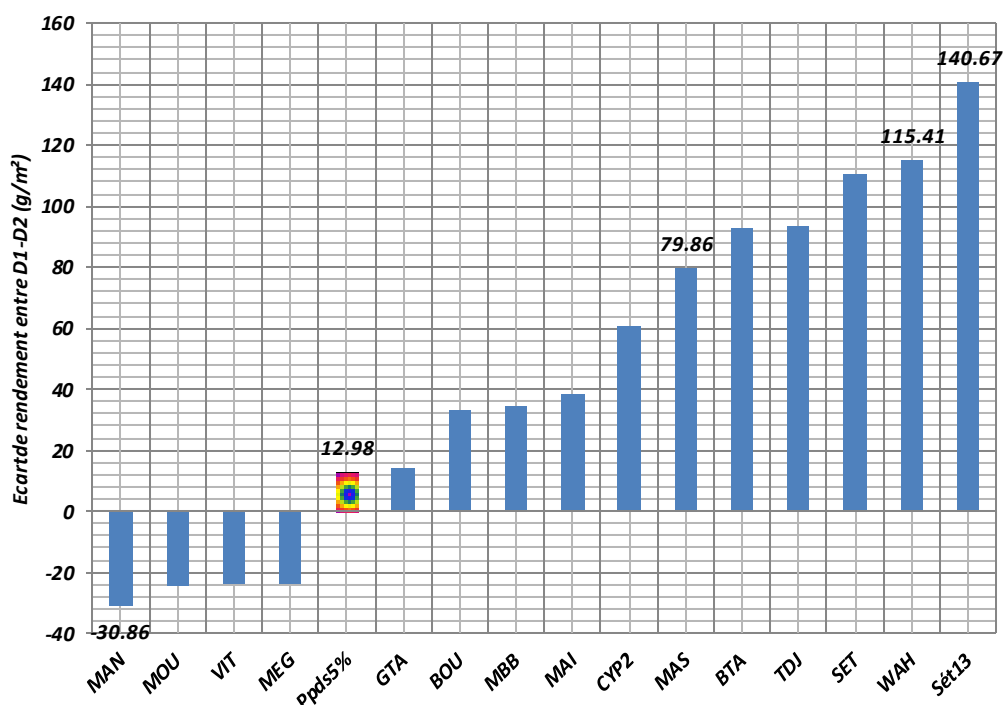
Par contre, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> de MBB, Gaviota durum, Megress, Setifis, Moustakbel, Mansoura et Vitron s'expriment significativement mieux en semis tardif qu'en semis précoce (Figure 14). Le nombre de grains produit par m<sup>2</sup> montre une

expression très variable selon la date et le génotype. Le nombre de grains/m<sup>2</sup> de Sétif<sub>2013</sub>, Waha, Setifis, Massara, Boutaleb, Tajdid, Cyprus2 et Massinissa est significativement plus élevé en semis précoce.

Bousselam se montre peu sensible au changement de dates de semis. Par contre Mansoura, Vitron, Moustakbel, Megress, et Gaviota durum produisent plus de grains par m<sup>2</sup>, en semis tardif (Figure 15). La réponse du rendement en grains à la date de semis, en moyenne des trois années d'étude, est variable selon les génotypes qui se subdivisent en deux groupes au comportement contrasté. Mansoura, Moustakbel, Vitron et Megress produisent significativement mieux en semis tardif (+25.7 g/m<sup>2</sup> en moyenne) ; alors que c'est l'inverse pour le reste des variétés (+74 g/m<sup>2</sup> en moyenne) (Figure 16).



**Figure 15.** Ecarts du NGM<sup>2</sup> et du poids de 1000 grains (PMG) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Badir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG= Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 16.** Ecarts de rendement en grains (RDT) entre dates précoce et tardive (moyennes de trois années), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013 ,Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Boussemam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Les résultats suggèrent que, de manière générale, les variétés s'expriment mieux en semis précoce, notamment pour les variables qui sont les déterminants du rendement en grains. De ce fait, l'adoption du semis précoce et la sélection de génotypes qui s'expriment mieux en semis précoce, améliore les performances de rendement en grains et certainement contribue à mieux valoriser et utiliser positivement l'interaction génotype x dates de semis.

Selon Sanchez-Garcia *et al.*, (2013), la variation, d'ordre environnementale, du rendement en grains est liée à celles des caractères qui en sont les déterminants, dont entre autres, les nombres de grains /m<sup>2</sup>, de grains par épi, le poids et le nombre d'épis /m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne, l'indice de récolte et le poids de 1000 grains. L'expression des gains réalisés sur ces caractères est dépendante de l'environnement. De ce fait la sélection doit cibler soit l'adaptation générale ou l'adaptation spécifique.

Les résultats, ci-dessus discutés, indiquent que les variétés répondent différemment aux effets années et dates de semis, et que, de manière globale, le semis précoce est plus favorable à l'expression des variables qui déterminent le rendement en grains. De ce fait chaque couple d'année x date de semis constitue un environnement indépendant.

Suleiman *et al.*, (2014) observent une réduction du rendement et des composantes chez les semis tardifs, les meilleures dates de semis étaient celles des 1 et 15 novembre et concluent que les semis tardifs réduisent les phases de développement de la plante et par conséquent affectent négativement le développement et les performances de la culture.

Quasim *et al.*, (2008) mentionnent que les meilleures valeurs des caractères agronomiques du rendement et des composantes s'expriment mieux en semis précoces. La réduction des valeurs de ces paramètres observées en semis tardifs est essentiellement due aux stress de fin de cycle de la culture dont l'intensité devient plus élevée. Les semis tardifs diminuent le nombre de talles herbacées, de talles fertiles le poids du grain et raccourcissent la durée des phases végétative et reproductive (Aslani et Mehrvar, 2012; Suleiman *et al.*, 2014).

Les semis au-delà de la date du 15 décembre réduisent le rendement grain de plus de 32.9%, réduction qui est expliquée par l'effet des stress de fin de cycle qui affectent plus les semis tardifs que les semis précoces (Ibrahim et Kittani, 2009 ; Ali *et al.*, 2010).

Suleiman *et al.*, (2014 ) recommandent les semis de la première moitié de novembre comme les plus bénéfiques pour les blés semés en zone semi-arides. Globalement tous les génotypes testés produisent un rendement plus faible en semis tardifs, cependant les différences de rendement entre semis précoces et semis tardifs sont variables selon les génotypes, suite à la présence d'une interaction génotypes x dates de semis significative.

## **2.5. ANALYSE DE L'INTERACTION DU RENDEMENT EN GRAINS**

### **2.5.1. ANALYSE COMBINÉE DU RENDEMENT EN GRAINS DES ANNÉES ET DATES DE SEMIS**

Les moyennes du rendement en grains du semis précoce sont de 511.0, 93.7, et 227.5 g/m<sup>2</sup> pour 2013, 2014, et 2015, respectivement (Tableau 11). Ceux du semis tardif sont de 469.9, 62.0, et 158.1 g/m<sup>2</sup>, respectivement (Tableau 11). La réduction relative du rendement en grains, mesurée en semis tardif est de 8.0, 33.8, et 30.5% du rendement du semis précoce, respectivement pour 2013, 2014, et 2015.

Ces résultats attirent l'attention sur les avantages du semis optimal et concordent avec ce qui a été rapporté par plusieurs auteurs dont Bassu *et al.*, (2009), Tapley *et al.*, (2013) et Silva *et al.*, (2014). Les coefficients de corrélation entre années, en semis précoce ( $r_{RDT13/RDT14} = -0.213^{ns}$ ,  $r_{RDT13/RDT15} = -0.049^{ns}$ ,  $r_{RDT14/RDT15} = -0.024^{ns}$ ), et en semis tardif ( $r_{RDT13/RDT14} = -0.057^{ns}$ ,  $r_{RDT13/RDT15} = 0.122^{ns}$ ,  $r_{RDT14/RDT15} = 0.460^{ns}$ ) sont non significatifs.

Les coefficients de corrélation entre les dates de semis par année étaient non significatifs en 2013 et en 2015 ( $r_{RDTs113/RDTs213} = 0.270^{ns}$ ,  $r_{RDTs115/RDTs215} = -0.057^{ns}$ ), et significatifs en 2014 ( $r_{RDTs114/RDTs214} = 0.604^*$ ). Ces résultats suggèrent la présence des interactions génotype x année et génotype x date de semis.

L'analyse de la variance combinée entre années et dates de semis indique que les différences en termes de rendement en grains entre environnements (dans le sens combinaison année x date de semis) expliquent 86.0% de la variation totale du rendement en grains (Tableau 9).

La subdivision de ces différences indique que les années et les dates de semis expliquent, respectivement, 84.3% et 1.6% (Tableau 9). Les différences entre génotypes expliquent 2.4%, alors que l'interaction génotype x environnement explique 11.6% de la somme des carrés des écarts des traitements.

La subdivision de la somme des carrés des écarts de l'interaction génotype x environnement indique que les composantes de l'interaction GxA, GxS et GxAxS contribuent, respectivement, pour 53.1, 18.3, et 28.6%. L'effet année et les interactions GxA et GxAxS contribuent pour une large proportion à la somme des carrés des écarts des traitements et au total de l'interaction GxE (Tableau 9).

La détermination de l'importance relative des sources de variation est nécessaire pour tirer meilleur parti de l'interaction. Zhang *et al.*, (2006) rapportent que la contribution des sites, des années et des dates de semis est proportionnellement plus importante que l'effet moyen génotype et l'interaction.

L'analyse de la variance AMMI du rendement en grains des trois années par date de semis indique que le semis précoce est plus discriminant entre les génotypes évalués que le semis tardif. En effet la somme des carrés des écarts génotype contribue pour 5.27% et 3.81% à la somme des carrés des écarts des traitements, respectivement pour les semis précoce et tardif (Tableau 10).

L'interaction GxA était plus importante en valeur en semis précoce qu'en semis tardif (Tableau 10), suggérant des conditions de croissance plus réactives, donc moins contraignantes en semis précoce qu'en semis tardifs.

Une proportion élevée de la somme des carrés des écarts de l'interaction GxA est expliquée par l'axe 1 de l'AMMI (IPCA<sub>1</sub>), en semis précoce (77.06% de la SCE de G xA) et en semis tardif (95.54% de la SCE de GxA). Ceci indique que le biplot de l'AMMI<sub>1</sub> décrit largement le comportement des génotypes évalués au cours des trois années par date de semis (Tableau 10).

Le biplot du rendement en grains mesuré en semis précoce indique que les années sont très différentes, 2014 étant la moins favorable (93.8 g/m<sup>2</sup>) et 2013 la plus favorable (511.0 g/m<sup>2</sup>) à l'extériorisation du rendement en grains (Figure 17).

**Tableau 9.** L'analyse combinée du rendement en grains des 15 géotypes testés au cours de trois années successives et deux dates de semis sur le site expérimental ITGC de Sétif.

Source	Ddl	SCE	CME	%SCE
Traitements	89	9681034.8	108775.7**	100.0
Environnements (E)	5	8328550.0	1665710.0**	86.0
Années (A)	2	8159450.0	4079720.0**	84.3
Semis (S)	1	151815.0	151815.0**	1.6
A x S	2	17294.0	8647.0**	0.2
Répétition / E	12	2113.9	176.1 <sup>ns</sup>	
Génotype (G)	14	229352.0	16382.3**	2.4
G x E	70	1123110.0	16044.5**	11.6
G x A	28	596493.0	21303.3**	53.1
G x S	14	205495.0	14678.2**	18.3
GxAxS	28	321125.0	11468.7**	28.6
Résiduelle	168	33675.6	193.5	

**Tableau 10.** Analyse de la variance AMMI du rendement en grains des 15 géotypes testés au cours de trois années successives et deux dates de semis sur le site expérimental ITGC de Sétif.

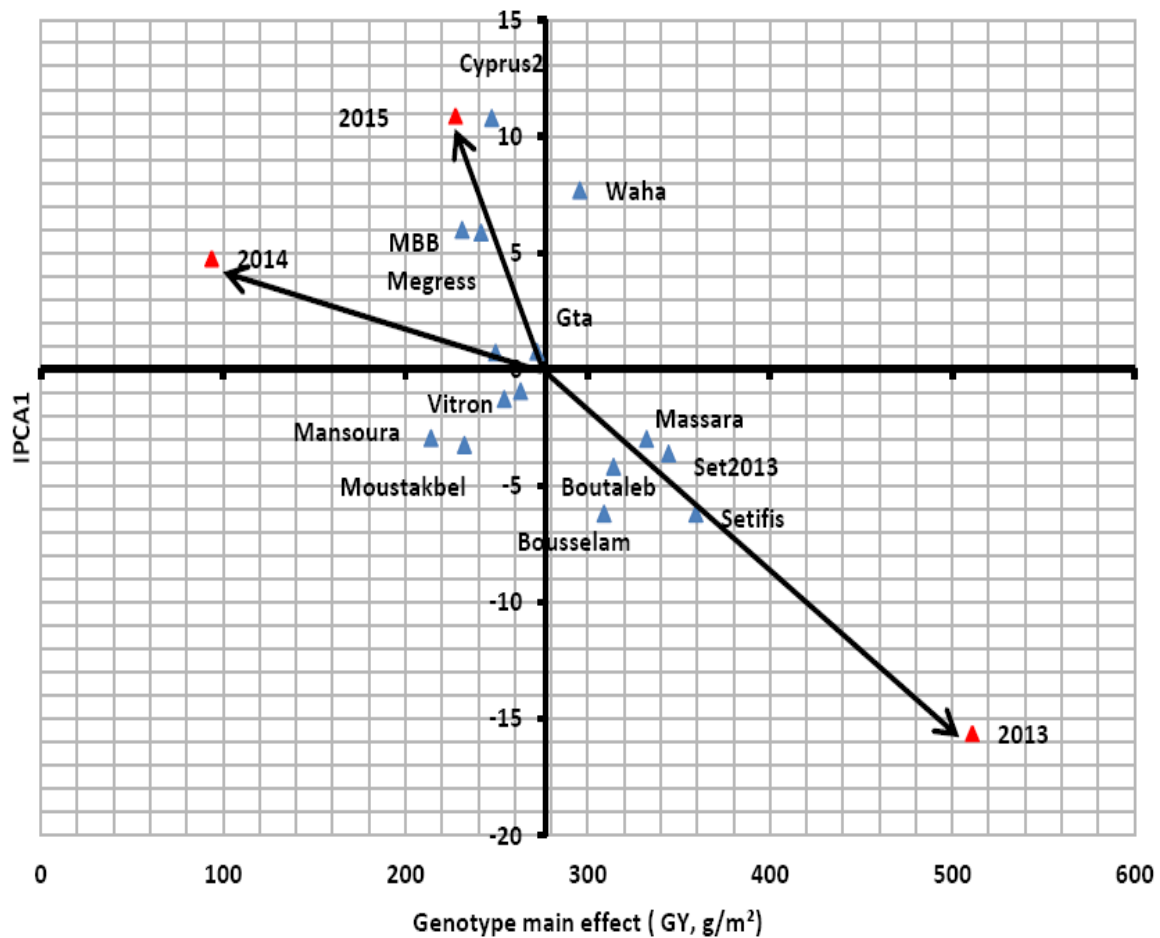
Source	Ddl	Semis précoce			Semis tardif		
		SCE	CME	%SCE	SCE	CME	%SCE
Traitements	44	4920520.00	111830.00**	100.00	4608690.00	104743.00**	100.00
Années (A)	2	4085010.00	2042505.00**	83.02	4091730.00	2045865.00**	88.78
Rép / A	6	1470.08	245.01 <sup>ns</sup>	--	1825.02	304.17 <sup>ns</sup>	--
Génotype (G)	14	259410.60	18529.33 <sup>ns</sup>	5.27	175436.40	12531.17 <sup>ns</sup>	3.81
G x A	28	576111.00	20575.39**	11.71	341508.00	12196.71**	7.41
IPCA <sub>1</sub>	15	443973.00	29598.20**	77.06	326289.00	21752.60**	95.54
Déviation	13	132136.80	10164.37**	22.94	15218.61	1170.66 <sup>ns</sup>	4.46
Résiduelle	83	33098.40	398.80		69878.70	841.91	

Les années 2013 (IPCA1 score de -15.62), et 2015 (IPCA1 score de 10.87), étaient les plus interactives, classant différemment les géotypes évalués. Cyprus<sub>2</sub> et MBB étaient moins performants alors que Setifis et Setif<sub>2013</sub> étaient relativement les plus performants en 2013; Par contre en 2015, Mansoura et Moustakbel étaient les moins performants alors que Waha et Cyprus<sub>2</sub> étaient les variétés les plus performantes.

Sur la base de l'effet moyen génotype, Mansoura montre une faible capacité de rendement alors que Setifis et Setif<sub>2013</sub> montrent une capacité plus élevée en semis précoce (Figure 17). Les géotypes qui présentent une moyenne de rendement en



grains supérieure à la grande moyenne sont Waha, Bousselam, Boutaleb, Massara, Setif<sub>2013</sub>, et Setifis.

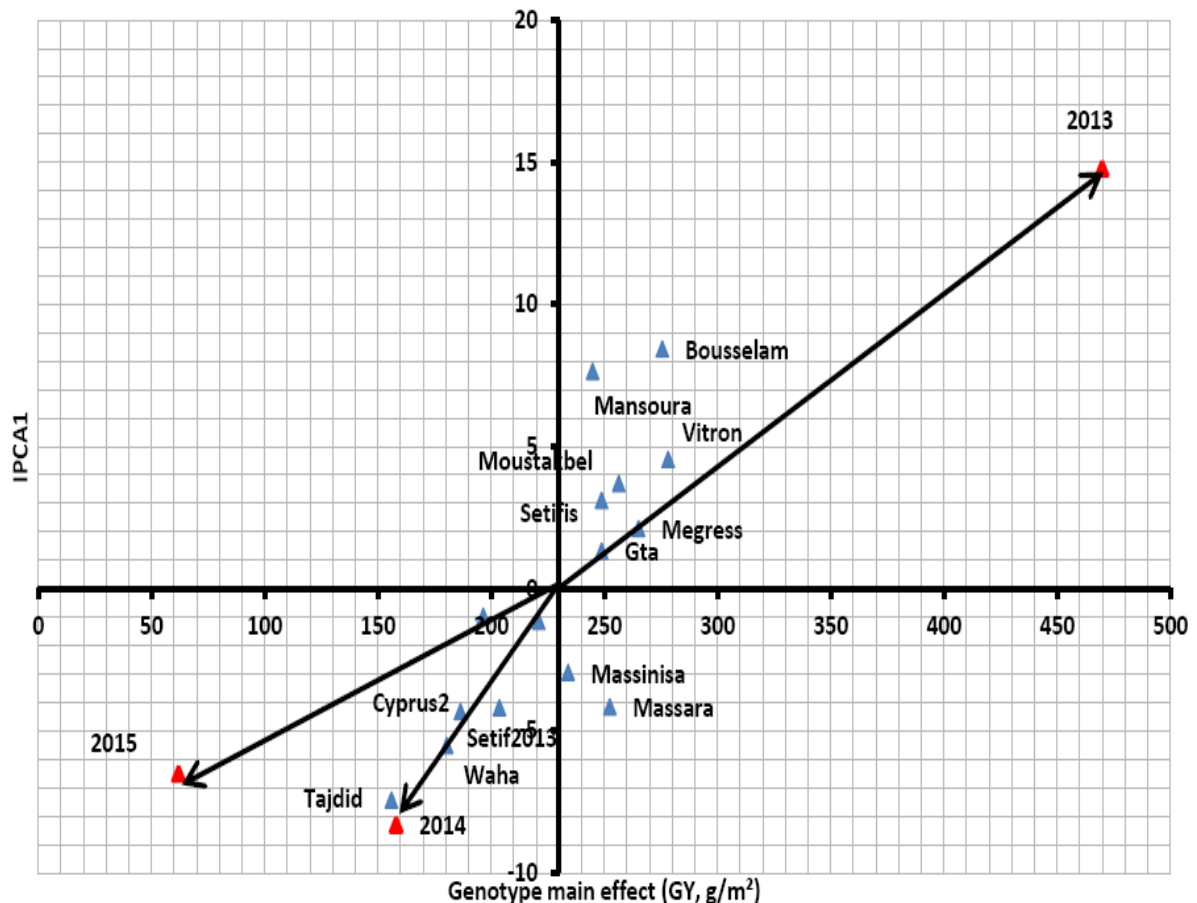


**Figure 17.** Biplot AMMI<sub>1</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués en semis précoce au cours de trois années sur le site expérimental ITGC de Sétif.

Présentant une moyenne de rendement inférieure à la grande moyenne, Tajdid, Vitron, Gaviota et Massinissa sont relativement plus stables, avec des IPCA1 scores variant de -1.29 à 0.74. Comparativement Bousselam, Setifis, dont l'IPCA1 score est inférieur à -5.00, et Waha ainsi que Cyprus<sub>2</sub>, dont l'IPCA1 score est supérieur à 7.00 sont les plus instables (Figure 17).

Le biplot présentant le comportement des différents génotypes en semis tardif montre une séparation nette des années avec 2015, étant la moins favorable au rendement (62.1 g/m<sup>2</sup>) et 2013 la plus favorable (469.9 g/m<sup>2</sup>) (Figure 18).

L'année 2013 dont l'IPCA1 score est de 14.79, et 2014, dont l'IPCA1 score est de - 8.29, étaient les environnements les plus interactifs. En 2013, Tajdid et Waha étaient les variétés les moins performantes alors que Mansoura et Bousselam étaient les plus performantes.



**Figure 18.** Biplot AMMI<sub>1</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués en semis tardif au cours de trois années sur le site expérimental ITGC de Sétif.

En 2014, Bousselam et Mansoura étaient les moins performantes, alors que Megress et Massara étaient les plus performantes. Sur la base de l'effet moyen génotype, Tajdid, Waha, Cyprus<sub>2</sub> et MBB présentaient une faible stabilité du rendement, alors que Vitron, Bousselam et Megress se caractérisent par une capacité élevée de rendement (Figure 18).

Les variétés dont la moyenne de rendement en grains était plus élevée que la grande moyenne sont Vitron, Bousselam, Megress, Moustakbel, Massara, et Setifis.

Seules les variétés Bousselam, Setifis et Massara présentaient une moyenne de rendement en grains plus élevée que la grande moyenne sous les conditions des deux dates de semis (Figures 17 et 18).

Boutaleb, MBB et Gaviota étaient relativement plus stables, dont les scores de l'IPCA1 variaient de -1.17 à 1.31. Parmi ces trois génotypes Gaviota a une moyenne de rendement supérieure à la grande moyenne. Les variétés instables en semis tardif sont Tajdid, Waha et Cyprus<sub>2</sub>, dont l'IPCA1 score est inférieur à -4.00, et Bousselam et Mansoura ont un score supérieur à 7.00 (Figure 18).

Les résultats de cette analyse montrent que le rendement en grains est plus affecté par l'effet année et l'interaction génotype x année par date de semis que par l'interaction génotype x date de semis. Plusieurs études indiquent que les différences entre années sont plus importantes que les différences entre dates de semis ou entre localités à l'intérieur d'une région donnée (Coventry *et al.*, 2011 ; Benin *et al.*, 2014).

Dans le cas de la présente étude l'interaction génotype x années était plus importante en semis précoce qu'en semis tardif. L'effet année sur le rendement en grains était le plus important aussi bien en semis précoce qu'en semis tardif.

Ces résultats suggèrent que l'augmentation du nombre d'années de testage est plus intéressante et plus justifiée que l'augmentation du nombre de dates de semis par année ou bien à la limite utiliser un nombre d'années plus important, en semis optimal ou précoce.

Analysant les effets années, localités et dates de semis sur les performances de rendement en grains, Benin *et al.*, (2014) rapportent que les années et les localités contribuent plus à l'interaction, expliquant respectivement 24.3% et 12.5%; alors que la date de semis contribue à l'interaction pour moins de 7.0%, seulement.

## 2.5.2. REGRESSION CONJOINTE

L'analyse de la variance du rendement en grains par date de semis, par année, montre un effet génotype significatif. Ceci indique des capacités génotypiques significativement différentes du rendement en grains entre les variétés évaluées (Tableau 11). La moyenne des rendements des 15 génotypes évalués varie de 62.0g/m<sup>2</sup> à 511.0 g/m<sup>2</sup>, valeurs moyennes obtenues en date 2 de la campagne 2014 (E4) et en date 1 (E1) de la campagne 2013.

Le rendement maximum de 702.4 /m<sup>2</sup> est obtenu par la variété Setifis, en date 1 (E1) de l'année 2013, et le minimum de 26.2 g/m<sup>2</sup> est enregistré par la variété Bousselam, en date 2 (E4) de l'année 2014. Massara prend la tête de classement dans les environnements E4 et E6, correspondant aux semis tardifs de 2014 et 2015. Par contre Vitron se classe en tête lors du semis précoce de 2014 et du semis tardif de 2015 (Tableau 11).

**Tableau 11.** Moyennes des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grains obtenu par date de semis, moyenne du rendement en grains par date et liste des génotypes à haut rendement par date.

Source de		Dates de semis (environnements)					
Variation	Ddl	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Genotype	11	38975**	32505**	2753**	2072**	17950**	2345**
Répétition	2	18.7	1.5	82.0	6.6	43.6	904.2
Erreur	22	180	358	35.0	70.5	138.8	364.1
CV (%)	--	13.4	18.9	8.0	8.4	11.8	19.1
RDT(g/m <sup>2</sup> )	--	511.0	469.9	93.8	62.0	227.5	158.1
Top génotypes <sup>§</sup>	--	Setifis	Bousselam	Vitron	Massara	Waha	Massara
							Massinissa
							Gaviota dur
							Vitron

\*\* = effet significatif au seuil de 1% de probabilité, § = génotypes dont la moyenne de rendement en grains est située dans la tranche du RDT<sub>max</sub> et RDT<sub>max</sub> - 1ppds5%.

Setifis est le meilleur génotype en semis précoce de 2013. En semis tardif de la même année, c'est Bousselam qui est le meilleur, alors que le cultivar Waha se classe comme le plus performant en semis précoce de l'année 2015. Le fait que les dates de

semis ou environnements classent différemment les génotypes évalués est une indication de la présence de l'interaction génotype x environnements.

L'analyse de la variance combinée du rendement en grains indique des effets environnements, génotypes et interaction génotype x environnements significatifs (Tableau 12). Avec 86.0%, l'effet environnement se présente comme la source de variation la plus importante. La somme des carrés des écarts de l'effet génotype ne représente que 2.4% et celle de l'interaction génotype x environnements 11.6% de la somme des carrés des écarts de l'ensemble des traitements (effets environnement + génotype + interaction génotype x environnements, Tableau 12).

**Tableau 12.** Analyse de la variance combinée du rendement en grains, intégrant la régression conjointe et l'AMMI.

Source	dll	Code	F ratio	SCE	CME	F cal	F crit 5%	%SCE
Traitement	89	M1	M1/M14	9681034.8	108775.7	526.2	1.4	100
Environnement (E)	5	M2	M2/M7	8328570.0	1665714.0	103.8	2.4	86
Rép/E	12	M3	-----	2113.9	176.2	0.9	2.2	
Génotype (G)	14	M6	M6/M7	229351.8	16382.3	1.0	1.9	2.4
E x G	70	M7	M7/M14	1123113.0	16044.5	77.6	1.5	11.6
Régression	14	M8	M8/M9	417876.0	29848.3	2.4	2.0	37.2
Déviation	56	M9	M9/M14	705237.0	12593.5	60.9	1.6	62.8
IPCA <sub>1</sub>	18	M10	M10/M13	634371.0	35242.8	33.9	2.3	56.5
IPCA <sub>2</sub>	16	M11	M11/M13	399735.0	24983.4	24.0	2.4	35.6
IPCA <sub>3</sub>	14	M12	M12/M13	66135.3	4724.0	4.5	2.5	5.9
Déviation	22	M13	M13/M14	22872.8	1039.6	5.0	1.9	
Erreur pondérée	168	M14		34730.3	206.7			
Total	269			9716090.0				

L'application du modèle de la régression conjointe explique 37.2% des 11.6% de la somme des carrés des écarts de l'interaction génotype x environnements. La part de l'interaction expliquée par la régression conjointe est significative, ainsi que la moyenne des carrés des écarts due à la déviation de la régression, ce qui suggère qu'une part importante de l'interaction, de l'ordre 62.8% de la somme des carrés des écarts, reste inexpliquée (Tableau 12).

Ces résultats indiquent l'hétérogénéité des coefficients de régression et suggèrent que la technique de la régression conjointe est partiellement efficace dans

l'explication de l'interaction génotype x environnements indiquée par l'analyse de la variance combinée.

Les résultats du test t des coefficients de régression indiquent que Cyprus<sub>2</sub> se distingue par une pente significativement inférieure à l'unité, alors que Setifis et Bousselam présentent un coefficient de régression significativement supérieur à l'unité. Le reste des variétés présentent des coefficients de régression qui ne sont pas significativement différent de l'unité (Tableau 13).

La représentation des performances de rendement en grains des variétés extrêmes, en figure 19, montre que Cyprus<sub>2</sub> répond peu à la fertilité des milieux. Il présente une adaptation aux environnements, plutôt peu fertiles (Figure 20). A l'inverse des génotypes Bousselam et Setifis qui s'adaptent mieux aux environnements à hautes potentialités (Figure 20).

Le reste de génotypes montre une adaptation plutôt générale, à l'ensemble des environnements testés, suite au fait que leur coefficient de régression ne dévie significativement pas de l'unité (Tableau 13 et Figures 19 et 20). Parmi ces génotypes, Massara présente des rendements au-dessus de la grande moyenne, en situation défavorable ( $a = 47.9 \text{ g/m}^2$ ) et en situation favorable (effet moyen de  $292.04 \text{ g/m}^2$ ).

La contribution individuelle à l'interaction génotype x environnements est non significative pour Gaviota durum et Massinissa, et significative pour les autres génotypes (Tableau 13). Gaviota durum et Massinissa réagissent faiblement à la variation des environnements, elles sont de ce fait stables, mais présentent des performances moyennes faibles comparativement à Setifis, Bousselam et Massara ( $256.0$  et  $253.1 \text{ g/m}^2$  vs  $304.1$ ,  $292.3$  et  $292.4 \text{ g/m}^2$ , respectivement).

La contribution la plus élevée vient des génotypes Cyprus<sub>2</sub> et Waha. Massara, Sétifi<sub>2013</sub>, Gaviota et Vitron ne contribuent pas significativement à la moyenne des carrés des écarts de la régression, ils présentent des réponses homogènes et

similaires à la variation de l'indice du milieu comparativement aux génotypes comme Cyprus<sub>2</sub>, Waha, Setifis et Bousselam qui contribuent plus à créer l'hétérogénéité entre les régressions (Tableau 13)

**Tableau 13.** Moyennes du rendement en grains (RDT, g/m<sup>2</sup>), coefficient de régression (b), écart type de b (et<sub>b</sub>), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de l'interaction génotype x environnements (CME<sub>GXE</sub>), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de la régression (CME<sub>REG.</sub>), contribution de chaque variété au carré moyen des écarts de la déviation de la régression (CME<sub>Dév.</sub>), corrélation au carré entre l'effet moyen du génotype et l'indice du milieu et ordonnée à l'origine (a, g/m<sup>2</sup>) des 15 variétés évaluées sur 6 environnements.

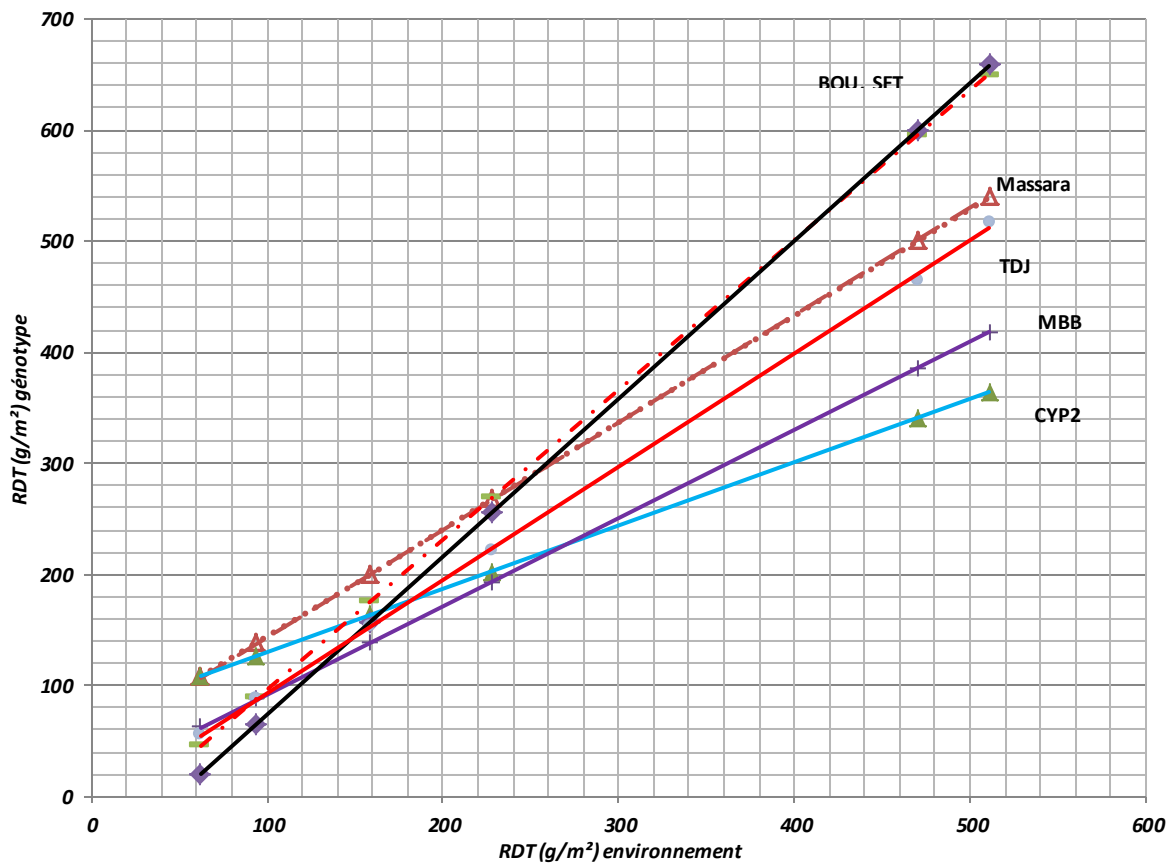
VAR	RDTmoy	b	et <sub>b</sub>	CME <sub>GXE</sub>	CME <sub>REG</sub>	CME <sub>DEV</sub>	R <sup>2</sup> (%)	a
MAS	292.4	0.964	0.12	2179.4*	246.1ns	2662.7*	2	47.9
Sét <sub>2013</sub>	274.0	1.069	0.19	5647.5*	883.1ns	6838.63*	3	2.9
CY2	217.0	0.569*	0.15	10337.6*	34414.4*	4318.4*	67	72.7
MBB	213.9	0.793	0.09	2880.3*	7938.1*	1615.9*	55	12.8
WAH	238.1	0.729	0.21	9579.5*	13594.0*	8575.9*	28	53.2
GTA	256.0	1.047	0.06	744.7ns	416.6ns	626.7ns	11	-9.6
VIT	266.2	1.048	0.19	5602.2*	434.1ns	6894.3*	2	0.4
MEG	253.4	0.831	0.16	5028.9*	5300.9*	4960.9*	21	42.6
SET	304.1	1.345*	0.09	5771.8*	22054.6*	1701.1*	76	-37.0
BOU	292.3	1.420*	0.09	7766.6*	32686.7*	1536.6*	84	-67.9
MAN	229.5	1.209	0.19	7439.4*	8104.0*	7273.2*	22	-77.2
MAI	253.1	0.898	0.05	752.7ns	1917.6*	461.5ns	51	25.4
TJD	202.8	0.827	0.16	4885.8*	5522.1*	4726.7*	23	-7.0
MOU	244.5	1.125	0.14	3839.4*	2906.0*	4072.8*	15	-40.9
BTA	267.7	1.125	0.11	2417.6*	2873.1*	2303.8*	24	-17.6

\* = pente significativement différente de 1 qui est la pente moyenne de l'ensemble des génotypes évalués ; ns, \*,\*\* = composante de la variance non significative et significative au seuil de 5% et 1% probabilité, respectivement, (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Tous les génotypes évalués, hormis Gaviota et Massinissa, contribuent significativement à la moyenne des carrés des écarts de la déviation de la régression, suggérant que la régression n'est pas efficace pour modéliser les comportements de ces génotypes, qui sont de ce fait instables selon la définition d'Eberhart et Russel (1966).

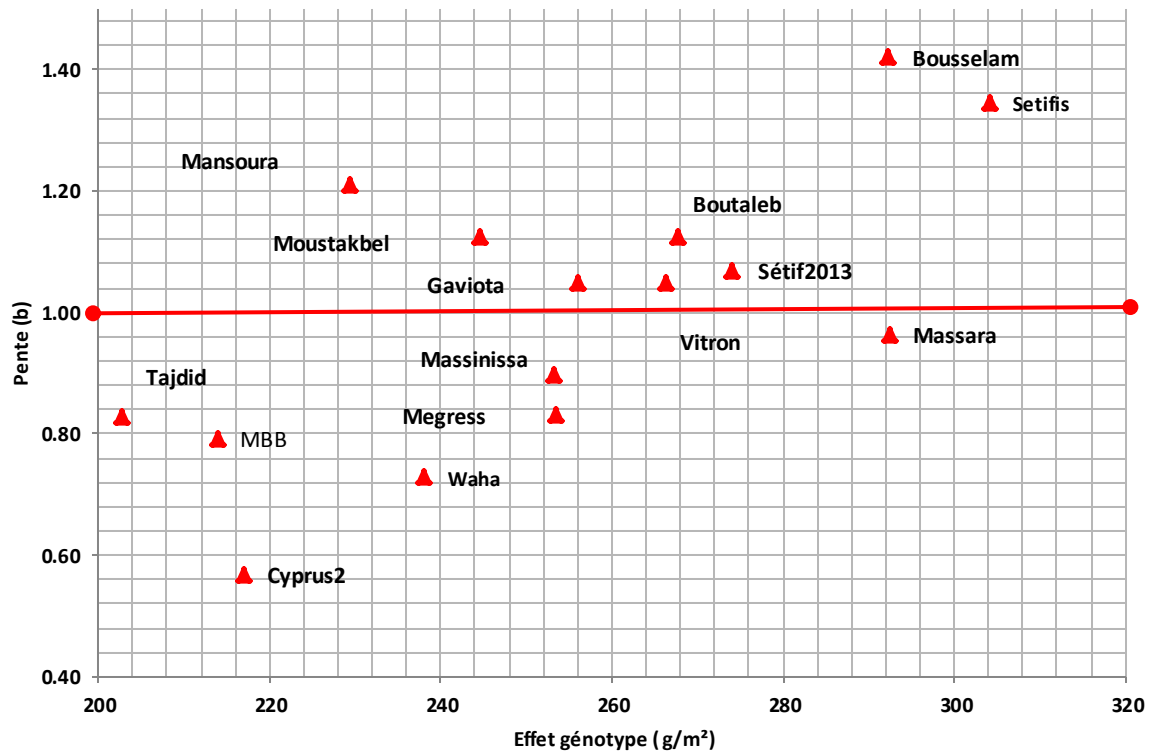
Les rendements observés de Gaviota et Massinissa ne dévient pas significativement de la droite moyenne de la régression, ils sont de ce fait stables selon les définitions de Finlay et Wilkinson (1963) ( $b = 1$ ) et Eberhart et Russell (1966) ( $S^2_{di} = 0$ ). Ils présentent une plus grande stabilité phénotypique.

Seuls les génotypes Cyprus<sub>2</sub>, Setifis et Bousselam présentent des coefficients de corrélation entre l'effet génotype et l'indice du milieu assez élevés supérieur à 0.810 ( $R^2 > 67\%$ ), suggérant que ces génotypes répondent à la fertilité des milieux (Tableau 13, Figure 19).



**Figure 19.** Régression linéaire des performances de rendement en grains des génotypes extrêmes en fonction de l'indice du milieu (environnement), (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).





**Figure 20.** Relation entre les performances moyennes de rendement en grains des génotypes et les coefficients de régression linéaire.

Sur la base des résultats de l'analyse de la régression conjointe, Setifs et Bousselam sont instables, ayant un  $b > 1$  et une ordonnée à l'origine négative. Ils sont spécifiquement adaptés aux environnements dont le potentiel de rendement en grains est supérieur à 300 g/m<sup>2</sup>. Par contre Cyprus<sub>2</sub>, avec un  $b < 1$  et une ordonnée à l'origine positive, est spécifiquement adapté aux environnements dont le potentiel est inférieur à 180 g/m<sup>2</sup>.

Aucun génotype ne montre une adaptation générale associée à un rendement en grains plus élevé, à la fois, en milieux défavorables et favorables, le comportement de Massara approche celui d'un tel génotype (Figures 19 et 20).

### 2.5.3. AMMI MODELE

Les deux premiers axes de l'IPCA expliquent 92.1% (56.5% et 35.6%) de la somme des carrés des écarts de l'interaction G x E, avec 48% des degrés de liberté de l'interaction. Le modèle AMMI apporte 2.5 fois plus d'informations explicatives de

l'interaction que le modèle de la régression conjointe (Tableau 12). Le biplot AMMI<sub>1</sub> indique les performances de chaque génotype et comment ces performances sont réalisées dans les différents environnements (Figure 21).

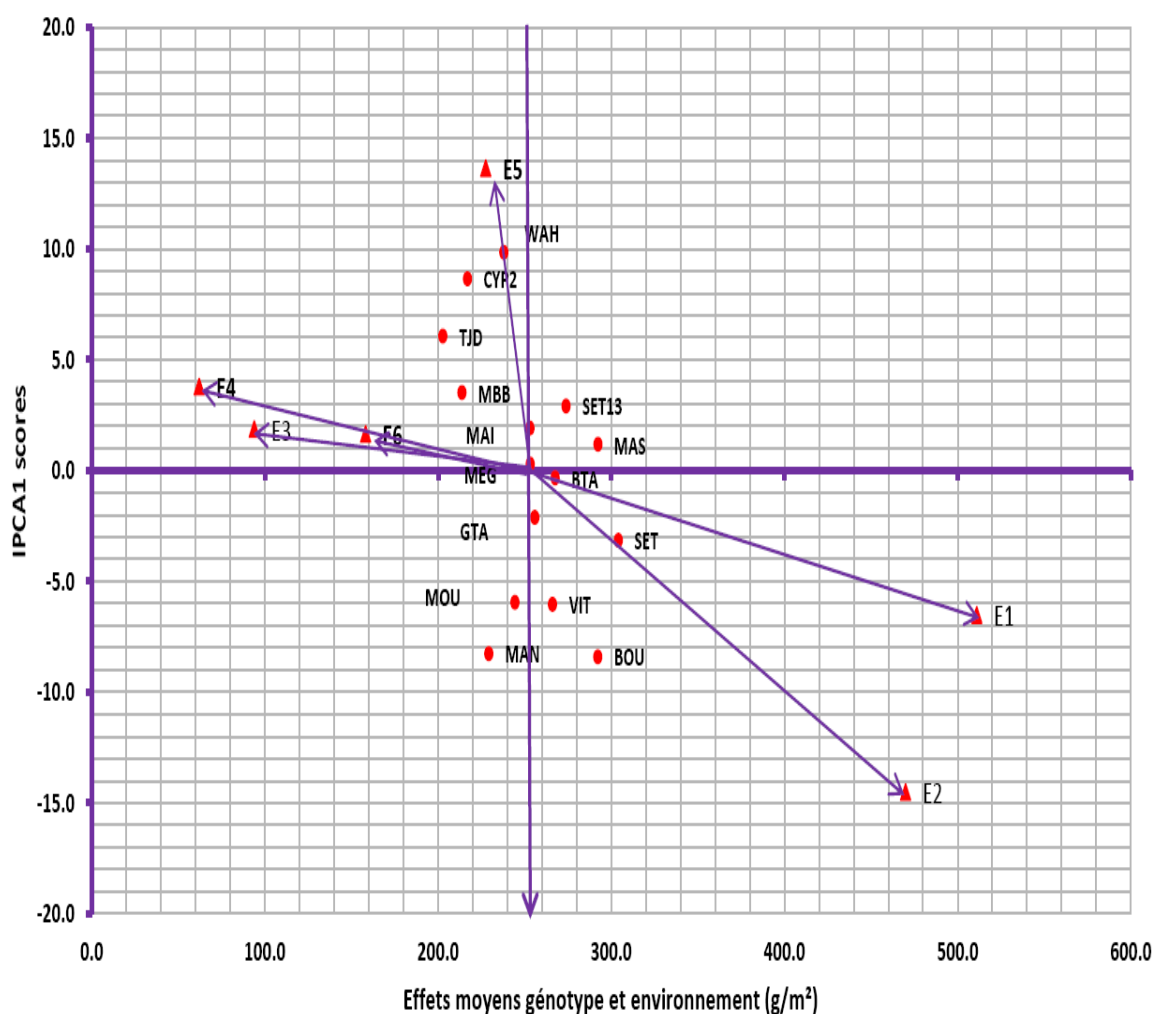
En moyenne de l'ensemble des environnements, Setifis, suivi de Bousselam et de Massara sont les plus performantes et Tajdid, MBB et Cyprus<sub>2</sub> sont les moins performantes. Les environnements les plus interactives sont E1 et E2 qui classent de manière différente les génotypes, comparativement aux environnements E3, E4 et E6. L'environnement E5 classe différemment les génotypes comparativement aux autres environnements.

Ainsi Setifis et Bousselam se classent mieux en E1 et E2, Waha et Cyprus<sub>2</sub> performant mieux en E5, alors que MBB, Massinissa et Tajdid performant mieux en E4, E3 et E6 (Figure 21). Sur la base des relations entre les scores des génotypes sur l'axe IPCA1 (GIPCA1) et les performances de rendement en grains, indiquées par le biplot AMM<sub>1</sub>, la majorité des variétés se caractérise par des scores de faibles valeurs suggérant une faible interaction génotype x localités.

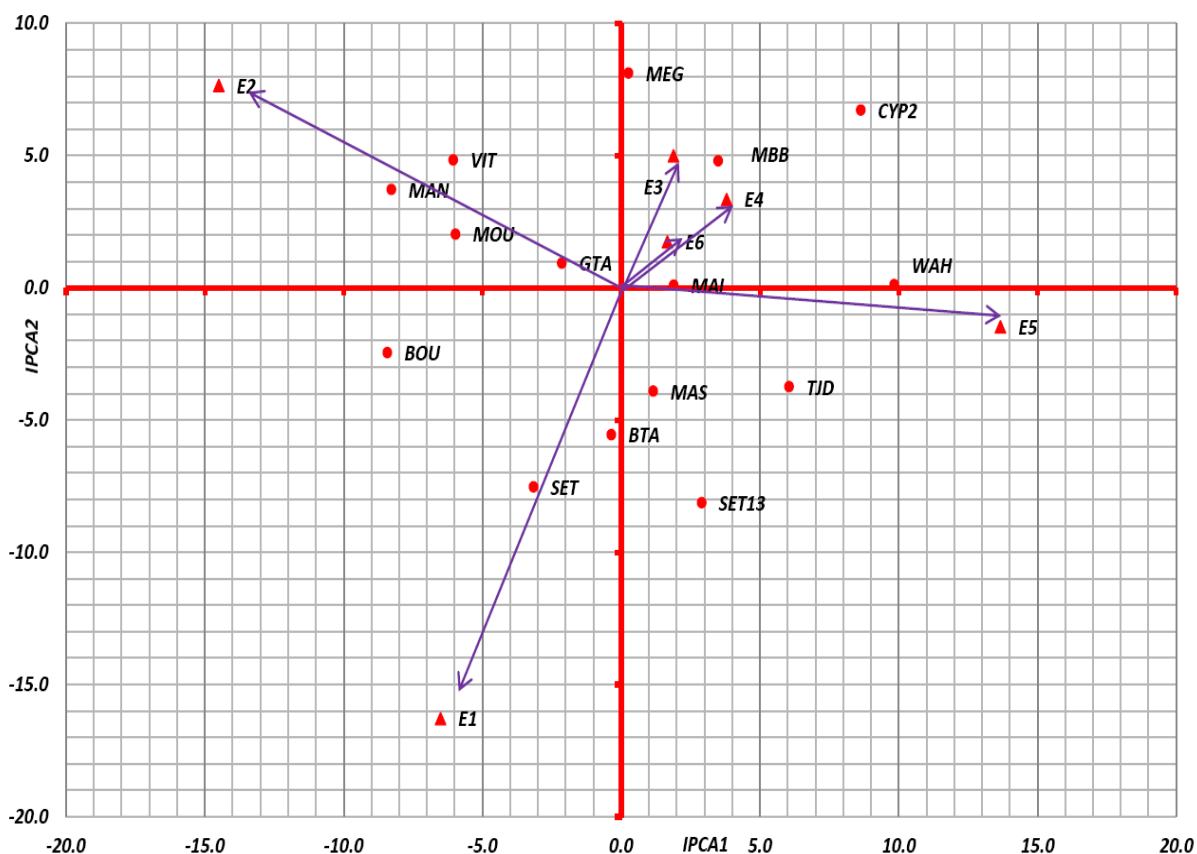
Cependant Waha et Cyprus<sub>2</sub> d'une part et Bousselam, Mansoura, Vitron et Moustakbel, d'autre part interagissent fortement avec les environnements. Bousselam a une interaction positive en E1 et E2 et négative en E5, alors que c'est l'inverse pour Waha et Cyprus<sub>2</sub> (Figure 21). Le biplot AMMI<sub>2</sub> (Figure 22) peut être utilisé comme indicateur de l'adaptabilité génotypique à la variation des environnements.

Les valeurs élevées des scores des génotypes indiquent une adaptation spécifique aux environnements proches de la position du génotype considéré. Les scores dont les valeurs sont proches de zéro indiquent une adaptation plutôt générale à l'ensemble des environnements échantillonnés. Les scores des génotypes et des environnements, de même signes, indiquent une interaction positive et donc un rendement élevé dans les environnements considérés.

L'AMMI<sub>2</sub> indique que les environnements testés classent différemment les génotypes évalués. Ainsi l'environnement E5 s'oppose à l'environnement E2, et l'environnement E1 s'oppose aux environnements E4, E3 et E6, qui forment un groupe homogène d'environnements et classent de la même façon les génotypes évalués. De par la taille de leurs scores, qui sont élevés, les environnements E5, E1 et E2 sont les plus interactifs et constituent une source d'interaction.



**Figure 21.** AMMI<sub>1</sub>-biplot du rendement en grains (g/m<sup>2</sup>) des 15 génotypes de blé dur évalués sur 6 environnements représentés par trois années et deux dates de semis, (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG= Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 22.** Biplot-AMMI<sub>2</sub> du rendement en grains des 15 génotypes de blé dur évalués sur 6 environnements représentés par trois années et deux dates de semis, (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG= Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

L'environnement E6 est le moins discriminant suite à la faible valeur de son score. Le classement des génotypes évalués dans cet environnement est similaire au classement moyen sur l'ensemble des environnements. Gta dur et Massinissa sont les plus stables, suite à leurs faibles scores qui les positionnent tout proche de l'origine des axes (Figure 22).

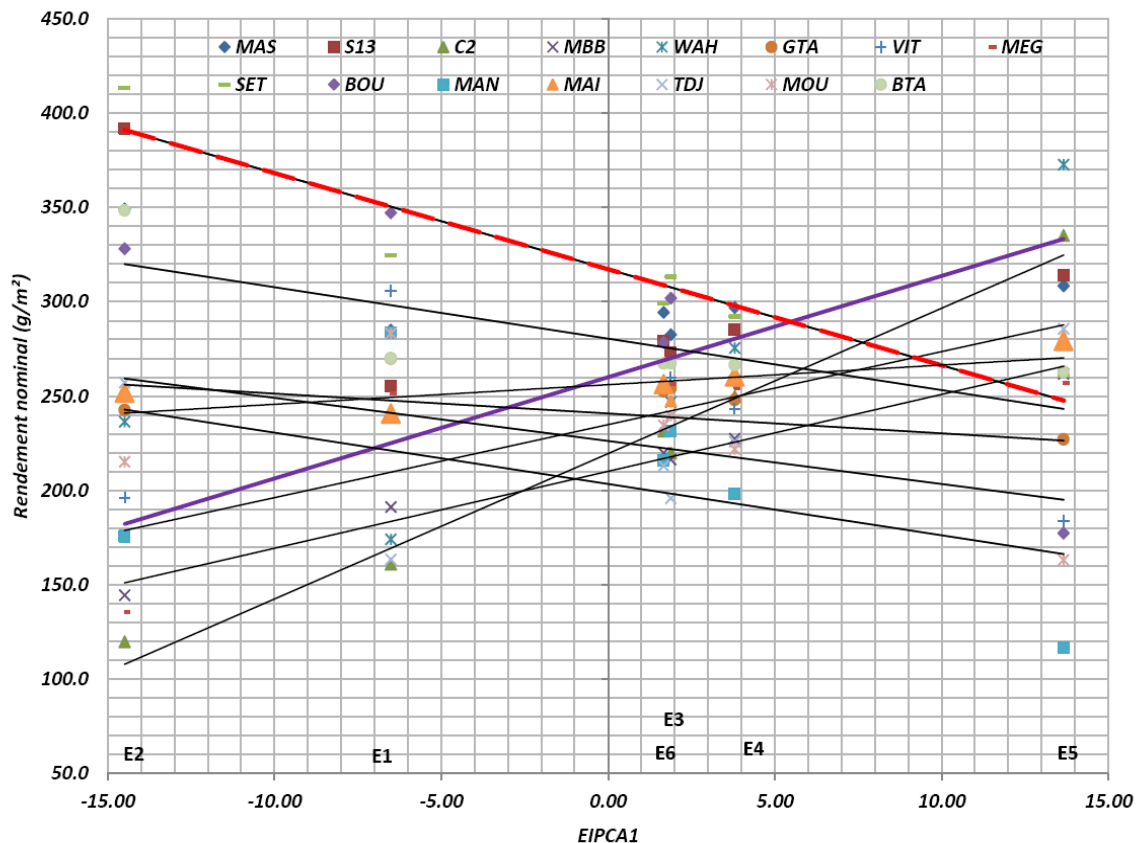
Le reste des génotypes montre une adaptation spécifique, confirmant la présence de l'interaction. Ainsi Massara, Setifis, Sétif<sub>2013</sub>, Bousselam et Boutaleb s'adaptent mieux en E1. Waha, Cyprus<sub>2</sub> et Tajdid en E5, MBB et Megress en E4, et E3 ; alors que Vitron, Mansoura et Moustakbel s'adaptent plus en E2 (Figure 22).

Comme les environnements sont constitués par le couple année x date de semis, il serait intéressant d'identifier les génotypes qui s'adaptent mieux à une date de semis

plus qu'à une autre, quelque soit l'année. De cette manière, on valorise à la fois l'effet génotype et l'interaction génotype x environnement.

### 2.5.3.1. RENDEMENT NOMINAL ET DOMAINES DE RECOMMANDATION VARIETALE

L'analyse de la figure 23 indique que l'évolution du rendement nominal départage les génotypes évalués, de par leurs réponses à la variation environnementale, en deux domaines de recommandations. Le premier domaine de recommandation est constitué de 5 environnements (E1, E2, E3, E4 et E6) et où Setifis est le plus performant et le second domaine de recommandation est représenté par E5 et où Waha est le plus performant (Figure 23).



**Figure 23.** Variation du rendement en grains nominal des 15 génotypes de blé dur évalués sur les 6 environnements représentés par 3 années et 2 dates de semis (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

### **2.5.3.2. CORRELATIONS ENTRE CARACTERES MORPHOLOGIQUES ET IGE DU RENDEMENT**

Selon Meziani (2016), l'IGE du rendement en grains, est due à la sensibilité du génotype vis-à-vis des stress abiotiques et biotiques qui caractérisent le milieu de production. Cette sensibilité, variable selon les génotypes, se manifeste sur presque l'ensemble des caractères qui constituent l'architecture de la plante, dont entre autres, la hauteur de la plante, le degré de précocité au stade épiaison, la biomasse aérienne et les composantes du rendement.

Les résultats de l'analyse de la variance des variables mesurées, dans le cadre de cette étude, résultats indiqués au tableau 5, corroborent ceux de Méziani (2016) et indiquent que les interactions année x dates, génotype x années, génotype x dates et génotype x années x dates de ces caractères sont hautement significatives.

L'analyse des corrélations entre les scores du rendement en grains des différents génotypes sur l'IPCA<sub>1</sub>, qui explique 56.5% de la somme des carrés des écarts de l'IGE, avec les valeurs moyennes génotypiques des caractères morphologiques indique que les scores sur l'IPCA<sub>1</sub> sont négativement corrélés avec le nombre d'épis ( $r_{IPCA1/NE} = -0.500^*$ ), le poids des épis ( $r_{IPCA1/PE} = -0.479^*$ ), et le poids de 1000 grains ( $r_{IPCA1/PMG} = -0.452^*$ ).

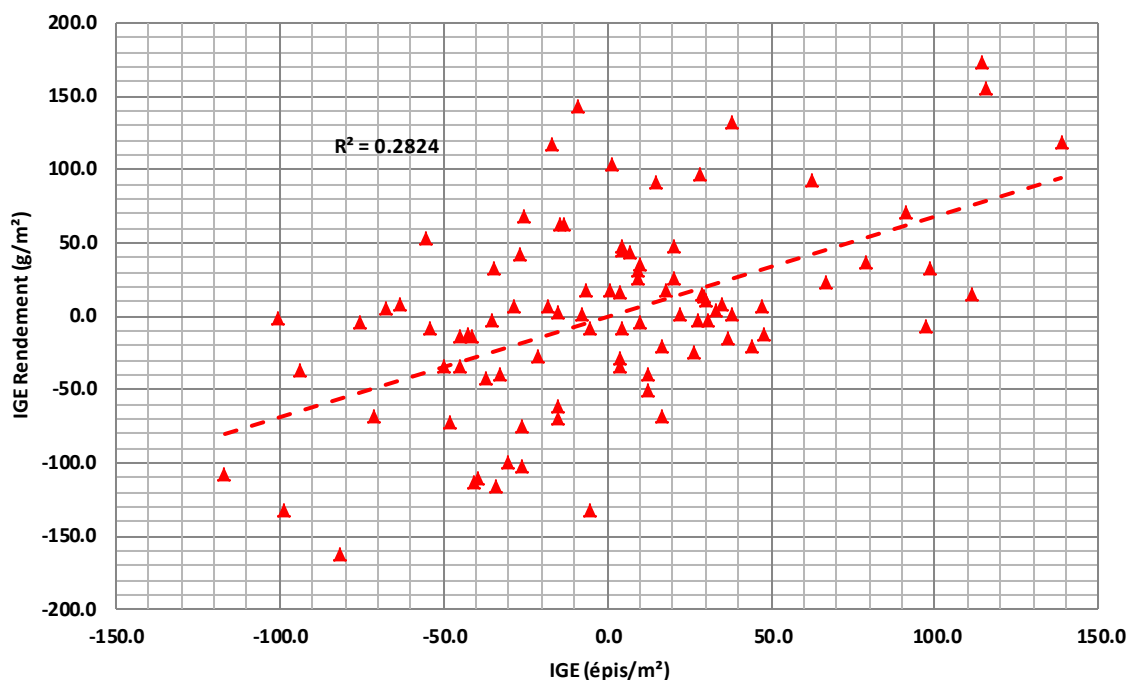
La régression progressive de l'IGE du rendement en grains sur les variables mesurées ne retient que le nombre d'épis qui explique 25.0% de la variance de l'IGE. La relation entre les écarts du nombre d'épis/m<sup>2</sup> du modèle additif ( $Y_{ij} - Y_{.j} - Y_{i.} + Y_{..}$ ) ou IGE du NE et les écarts du modèle additif du rendement en grains est donnée en figure 24. Ces résultats indiquent que la variation du nombre d'épis produit par unité de surface contribue significativement à l'IGE du rendement en grains

Les scores sur l'IPCA<sub>2</sub>, qui explique 35.6% de la somme des carrés des écarts de l'IGE, sont négativement corrélés avec le poids des épis ( $r_{IPCA2/PE} = -0.629^*$ ), la hauteur de la végétation ( $r_{IPCA2/PHT} = -0.551^*$ ), et le nombre de grains par épi ( $r_{IPCA2/NGE} = -$

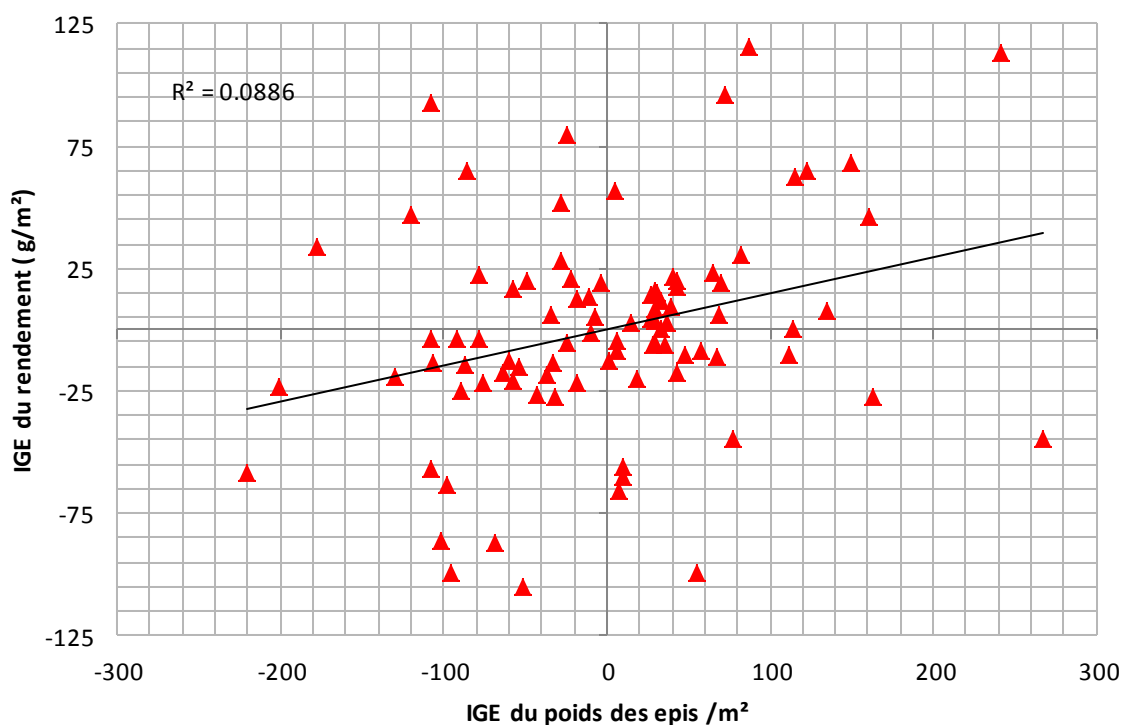
0.542\*). La régression progressive des valeurs de l'IPCA<sub>2</sub> sur les valeurs des variables PE, PHT et NGE, ne retient que le poids des épis qui explique 43.7% de la variance de l'IGE du rendement en grains.

La relation entre les écarts du poids des épis g/m<sup>2</sup> du modèle additif ( $Y_{ij}-Y_{.j}-Y_{i.}+Y_{..}$ ) ou IGE du PE et les écarts du modèle additif du rendement en grains est donnée en figure 25. Ces résultats indiquent que la variation du nombre d'épis/m<sup>2</sup>, au même titre que le poids des épis/m<sup>2</sup>, contribuent significativement à l'IGE du rendement en grains.

Dans ce contexte, Nachit *et al.*, (1992) rapportent que la hauteur de la plante ainsi que la capacité de tallage épi participent à hauteur de 59% à la manifestation de l'IGE du rendement en grains du blé dur conduit sous conditions pluviales des zones semi-arides de la région WANA.



**Figure 24.** Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du nombre d'épis/m<sup>2</sup> des 15 génotypes étudiés.



**Figure 25.** Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du poids des épis/m<sup>2</sup> des 15 génotypes étudiés.

Les deux variétés, les plus interactives le long de l'IPCA1, sont Waha, dont le score est 8.639, et Bousselam, dont le score est -8.415 (Figure 21). L'interaction du rendement en grains et des épis/m<sup>2</sup>, exprimée dans les 6 environnements, par ces deux génotypes, sont données en figure 26.

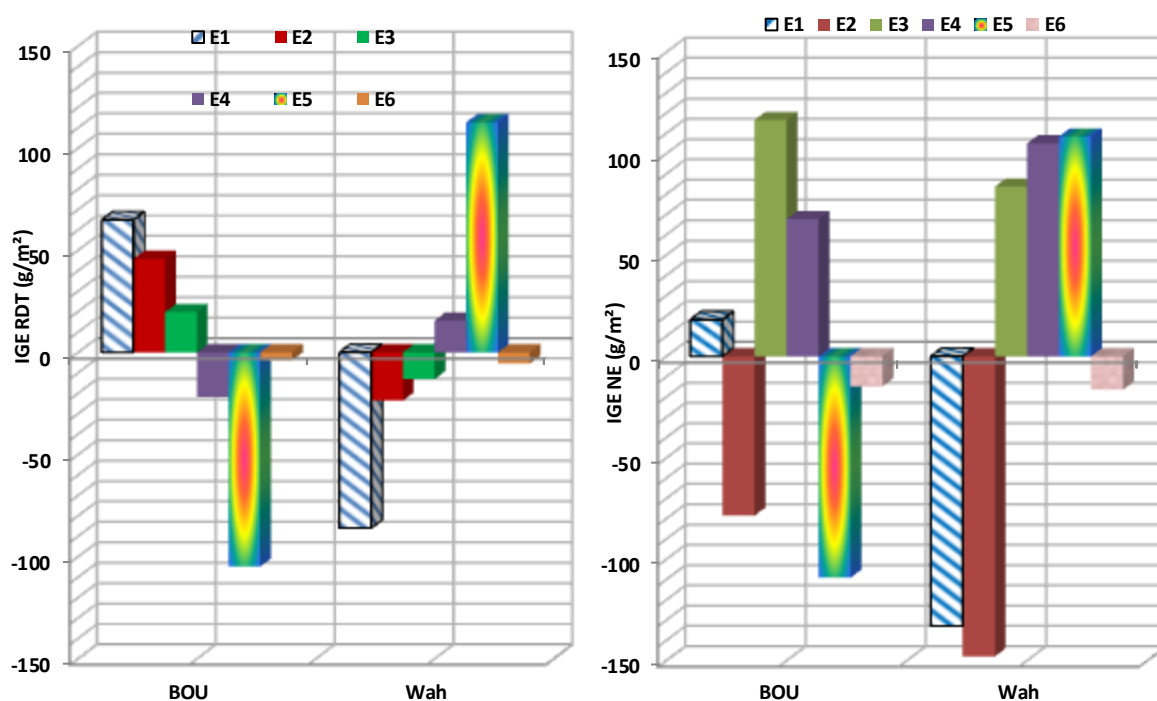
L'analyse de cette figure indique un comportement très contrasté des deux génotypes. Ainsi les environnements favorables à Bousselam ne sont pas forcément ceux qui le sont pour Waha. Il en est de même que les ressources d'un même environnement ne sont pas valorisées de la même manière par les deux variétés. Ainsi pour produire du grain, Bousselam réagit positivement aux environnements E1, E2 et E3, alors que Waha réagit négativement à ces mêmes environnements (Figure 26).

Bousselam semble tolérer (dans le sens esquivé, évitement ou résistance) les contraintes présentes dans ces environnements ; alors que Waha se montre plutôt sensible. Le comportement inverse est noté dans les environnements E4 et E5 où Waha réagit positivement alors que Bousselam réagit négativement ; par contre dans



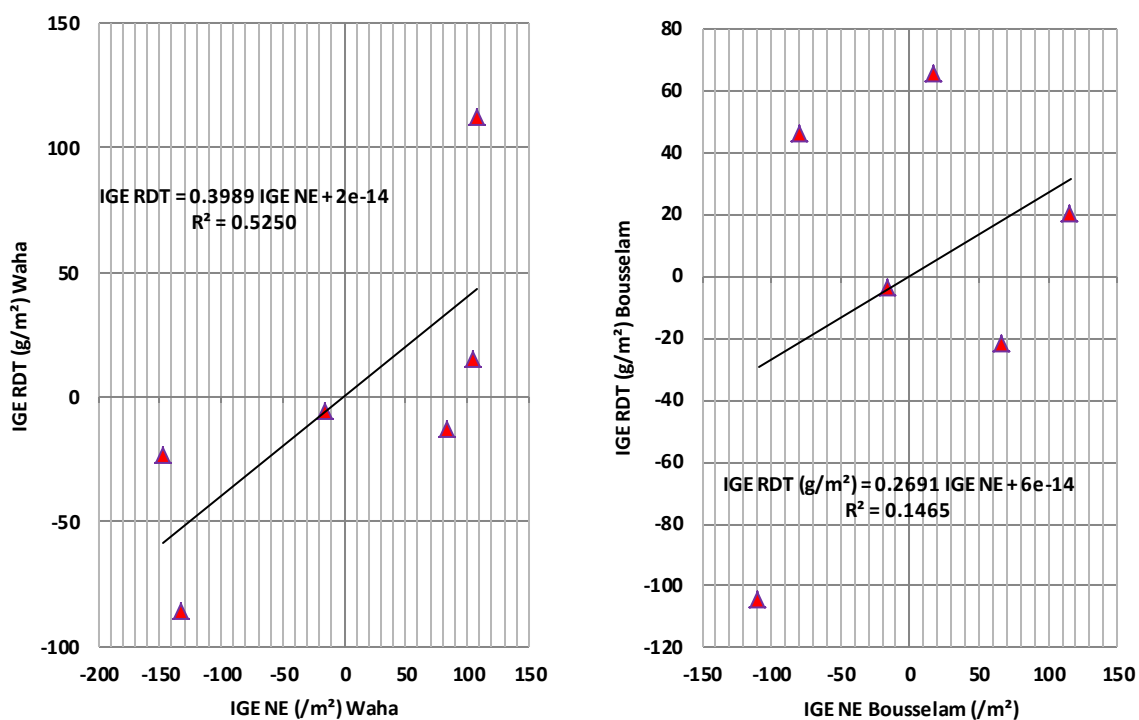
l'environnement E6, les deux génotypes présentent un comportement similaire vis-à-vis des contraintes et ressources du milieu (Figure 26).

Ces divers comportements génotypiques sont partiellement expliqués par la réactivité des deux génotypes pour la production des épis/m<sup>2</sup> dans certains environnements et ceci plus pour Waha que pour Bousselam. En effet la relation de l'IGE du rendement avec celle des épis est plus étroite pour Waha ( $r^2 = 0.5250$ ) que pour Bousselam ( $r^2 = 0.1475$ ) (Figure 27). Ceci suggère la complexité des causes engendrant l'interaction génotype x environnements du rendement en grains.



**Figure 26.** IGE du rendement en grains des deux variétés les plus interactives le long de l'IPCA<sub>1</sub>.

Les déviations du modèle additif pour le nombre d'épis/m<sup>2</sup> (IGE du NE), des différentes variétés sont données en figure 28. L'analyse de cette figure montre que les variétés qui réagissent le plus, positivement et dans certains environnements, sont Cyprus<sub>2</sub>, MBB, Gaviota durum, Megress, Setifis et Mansoura. Ces génotypes possèdent la capacité de répondre à la fertilité du milieu, en augmentant de manière significative, le nombre d'épis/m<sup>2</sup>.

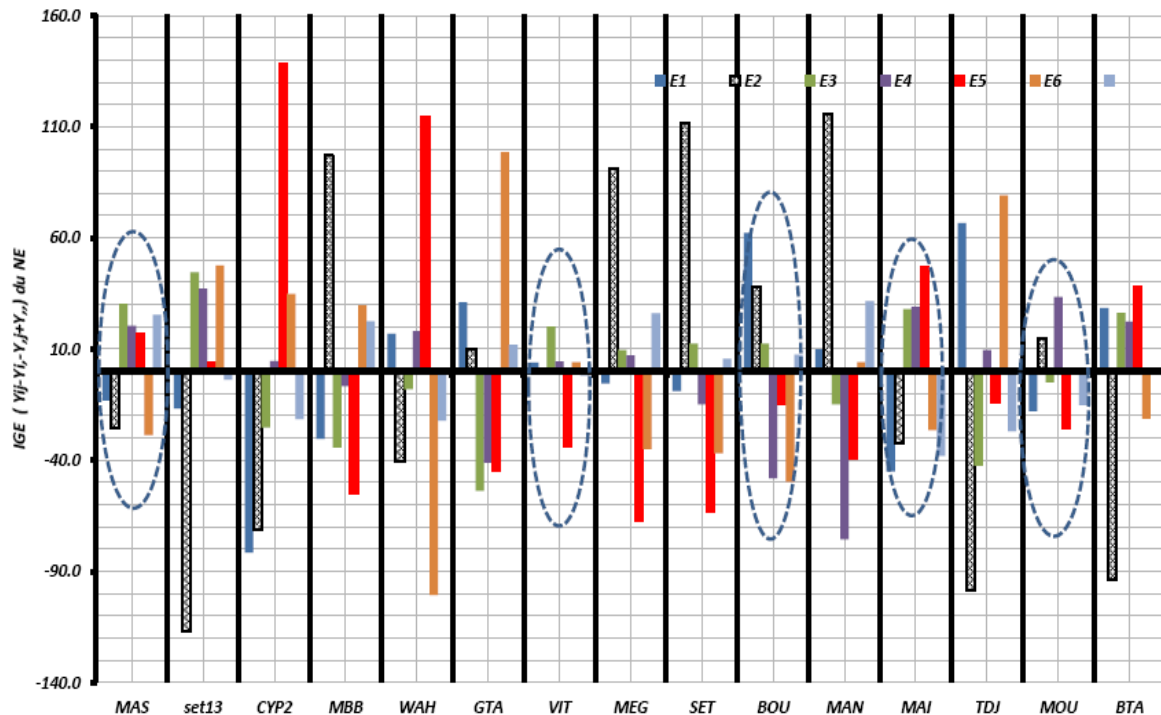


**Figure 27.** Régression de l'IGE du rendement en grains sur l'IGE du nombre d'épis /m<sup>2</sup> des deux variétés, Waha et Bousselam, les plus interactives le long de l'IPCA<sub>1</sub>.

Ces mêmes géotypes semblent tolérants aux stress, puisqu'ils ne réduisent pas, de manière importante, le nombre d'épis dans la plus part des environnements testés (Figure 28). Seule la variété Waha présente des réductions et des augmentations, importantes, du nombre d'épis/m<sup>2</sup>, variables selon les environnements.

Cette variété est donc, sensible à la contrainte et elle est, aussi, apte à répondre à la fertilité du milieu, en augmentant son potentiel de production d'épis/m<sup>2</sup>, dès que les conditions de croissance le permettent (Figure 28).

La composante du rendement en grains, qui est le nombre d'épis/m<sup>2</sup>, se forme sur une longue période du cycle végétatif, comparativement aux deux autres composantes qui sont le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains. Cette composante est déterminée dès le stade végétatif épi- 1cm. Elle est sujette à la variation des conditions hydriques, nutritionnelles et thermiques, dès le début tallage jusqu'au stade épiaison.



**Figure 28.** Variation des écarts dus à l'IGE du nombre d'épis /m<sup>2</sup> des 15 géotypes étudiés, selon les environnements (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Ainsi les pluies tardives affectent les géotypes aptes à repartir en végétation et qui font monter des tardillons. La grêle affecte plus les géotypes dont le rachis est fragile et cassant et ceux qui sont précoces. Alors que le gel tardif affecte plus les géotypes sensibles au froid et précoces d'épiaison.

Tous ces facteurs, dont les évènements sont variables selon les environnements, concourent à la variation de cette composante, qui induit indirectement et partiellement la variation du rendement en grains, origine de l'interaction géotype x environnements.

Ces résultats suggèrent que, pour réduire de l'IGE du rendement en grains, il faut garder sous contrôle la variation, inter environnements, du nombre d'épis/m<sup>2</sup> qui doit être la plus faible possible. Les géotypes qui possèdent la capacité de minimiser la

variation du nombre d'épis/m<sup>2</sup> existent comme l'attestent les résultats de cette étude (Massara, Vitron, et Moustakbel, à titre d'exemple, Figure 28).

Pour consolider la stabilité du nombre d'épis/m<sup>2</sup>, il est essentiel, entre autres, de sélectionner pour la tolérance au gel tardif et/ou pour une longue durée levée-épiation, associée à une courte durée épiation-maturité, comme le proposent Abbassenne *et al.*, (1998) ; ainsi que Mekhlouf *et al.*, (2006).

En effet, en présence d'IGE du rendement, les sélectionneurs cherchent à déterminer les causes d'une telle interaction. Selon Baker (1988), des différences de réduction de la réponse génotypique sous conditions défavorables reflètent des différences de tolérance alors que des différences de réponses à la fertilité du milieu reflètent des différences d'efficacité.

Ainsi des différences de résistances aux maladies peuvent engendrer des IGE (Gravois *et al.*, 1990). Des différences de hauteur de la végétation et de durée de cycle entre génotypes sont autant de facteurs qui contribuent à l'IGE (Yan et Hunt, 2002). Magari *et al.*, (1997) montrent que des différences génotypiques d'utilisation des précipitations par le maïs, au cours du cycle, engendrent des IGE du rendement en grains.

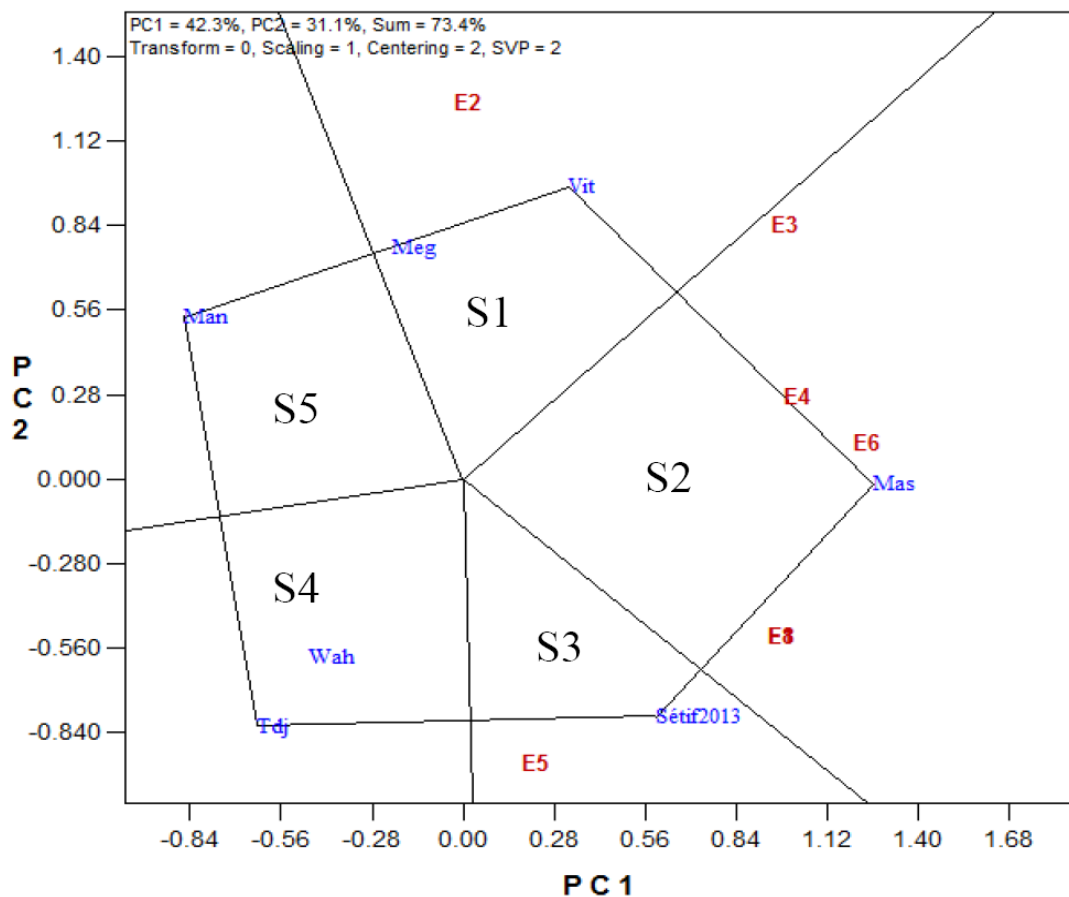
Yan et Hunt (2001) trouvent une corrélation significative entre les scores du l'IPCA<sub>2</sub> et la capacité de tallage herbacée chez l'orge. Cette corrélation significative suggère que la capacité de tallage chez l'orge est une cause de l'interaction du rendement en grains.

#### **2.5.4. MODELE GGE**

##### **2.5.4.1. WHICH WON WHERE**

Les composantes une et deux du biplot GGE expliquent 73.4 % de la variation totale des données du rendement en grains soumises à l'analyse, avec 42.3% pour la première et 31.3% pour la deuxième composante. Le biplot identifie 5

environnements potentiels typiques (S1 à S5 de la figure 29), dont trois (S1 S2 et S3) sont représentés parmi les environnements testés (E2, E1≈E3≈E4≈E6, E5) dans la présente étude alors que les deux autres non pas d'environnements représentatifs (Figure 29).



**Figure 29.** Environnements et génotype performant par environnement « which-won-where » (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Les génotypes vertex sont Vitron qui est plus performant dans l'environnement E2, Massara qui est le plus performant dans l'ensemble des environnements constitué par E1, E3, E4 et E6 ; alors que Sétif<sub>2013</sub> se classe en tête dans l'environnement E5.

Ces résultats indiquent que les environnements E1, E3, E4 et E6 ont la même capacité de discrimination des performances génotypiques, qu'ils sont des

représentants doubles de l'environnement potentiel S2. Le reste des géotypes ne sont pas représentés dans aucun environnement particulier ce qui indique qu'ils ont une performance moyenne à médiocre dans l'ensemble des environnements tests (Figure 29).

#### ***2.5.4.2. DISCRIMINATION, PERFORMANCE ET STABILITE***

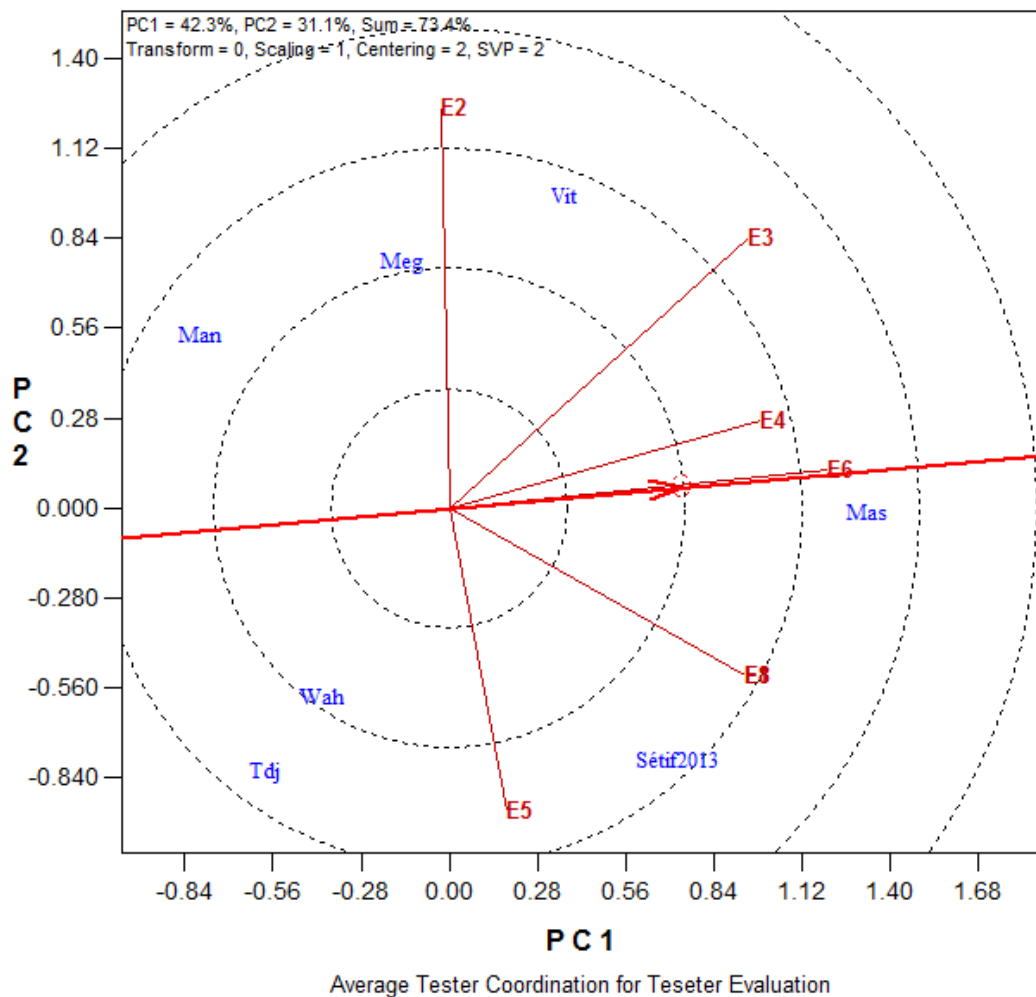
La longueur du vecteur environnement est une indication de l'aptitude de cet environnement à discriminer entre les géotypes testés. Tous les environnements testés présentent la même aptitude à discriminer entre les différents géotypes testés (Figure 30). Le classement des différents géotypes sur la base des performances de rendement en grains et de la stabilité est donnée en figure 31.

Le géotype Massara est le plus performant et le plus stable. Il est suivi du point performance par Sétif<sub>2013</sub> et Vitron qui sont moins stables que Waha mais plus performants que ce dernier (Figure 31). Les variétés Massara, Sétif<sub>2013</sub> et Vitron ont des performances supérieures à la moyenne générale (sont situées près du géotype idéal, matérialisé par un cercle en pointillé sur la figure 31). Les géotypes Mansoura, Tajdid, Waha et Megress sont relativement instables et moins performants (Figure 31).

Dans la méthode GGE, l'effet environnement n'est pas d'intérêt pour le sélectionneur, mais c'est plutôt l'effet géotype ( $G = Y_i - \bar{Y}_{..}$ ) et l'IGE ( $IGE = Y_{ij} - Y_i - \bar{Y}_{.j} + \bar{Y}_{..}$ ) qui sont les critères de choix de la performance et de la stabilité. La moyenne des effets ( $G + IGE$ ) est un indicateur de la performance du géotype. La variance des effets ( $G + IGE$ ), divisée par la variance minimale, est un indicateur de la stabilité.

La représentation des performances moyennes et de la stabilité des géotypes évalués est donnée en figure 32. On note que les géotypes les plus performants sont Setifis, Massara et Sétif<sub>2013</sub>, et à degré moindre Bousselam et Boutaleb, avec des

écarts positifs variant de 28.5 à 63.6 g/m<sup>2</sup>, au- dessus de la moyenne générale des 15 génotypes étudiés.

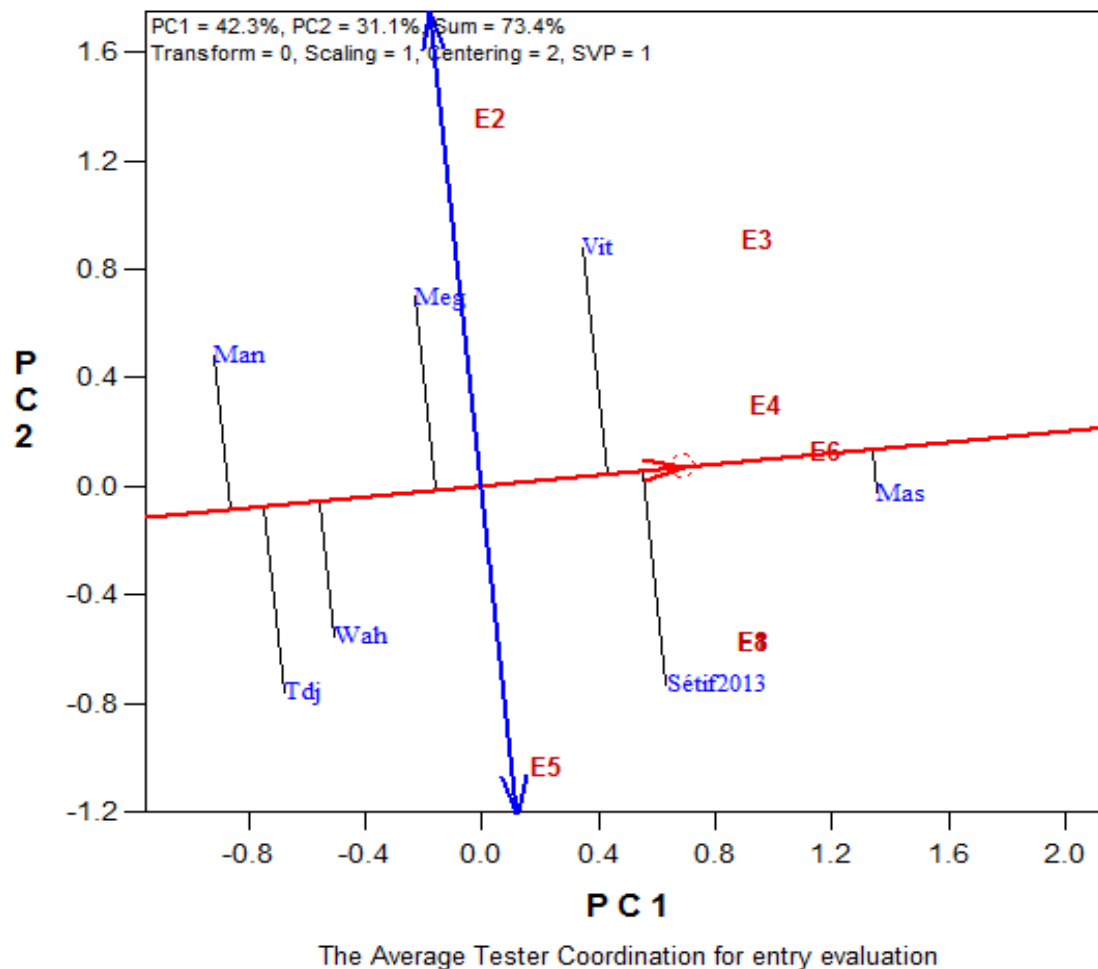


**Figure 30.** Discrimination et représentativité des différents environnements (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bouselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

Parmi ces génotypes le plus stable est Massara, avec une variance qui est juste 3.4 fois plus élevée que celle du génotype Massinissa, prise comme l'unité, étant la plus faible en valeur (Figure 32). Cyprus2 est le plus instable, il présente une variance 31.7 fois plus élevée que celle de Massinissa (Figure 32). Les génotypes les moins performants sont Mansoura, Tajdid, MBB, Moustakbel et Cyprus<sub>2</sub>.

Les performances, dans les 6 environnements testés, des trois meilleurs génotypes : Setifis, Massara et Sétif<sub>2013</sub>, pour le rendement en grains, en comparaison

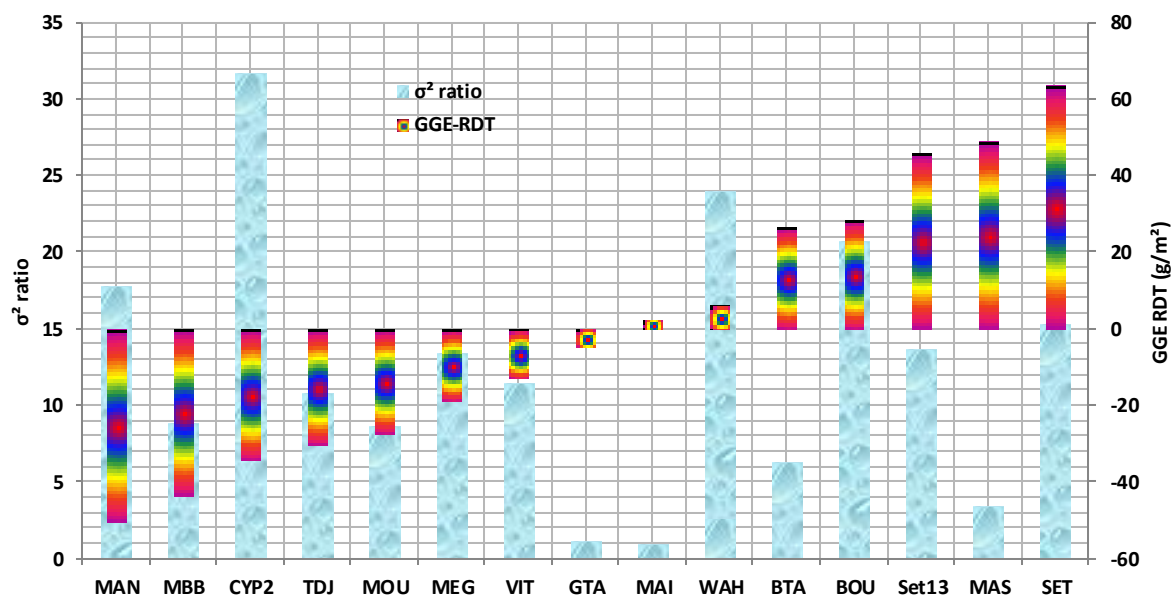
avec les trois témoins de la grande culture : Bouselam, MBB et Waha, sont données en figure 33.



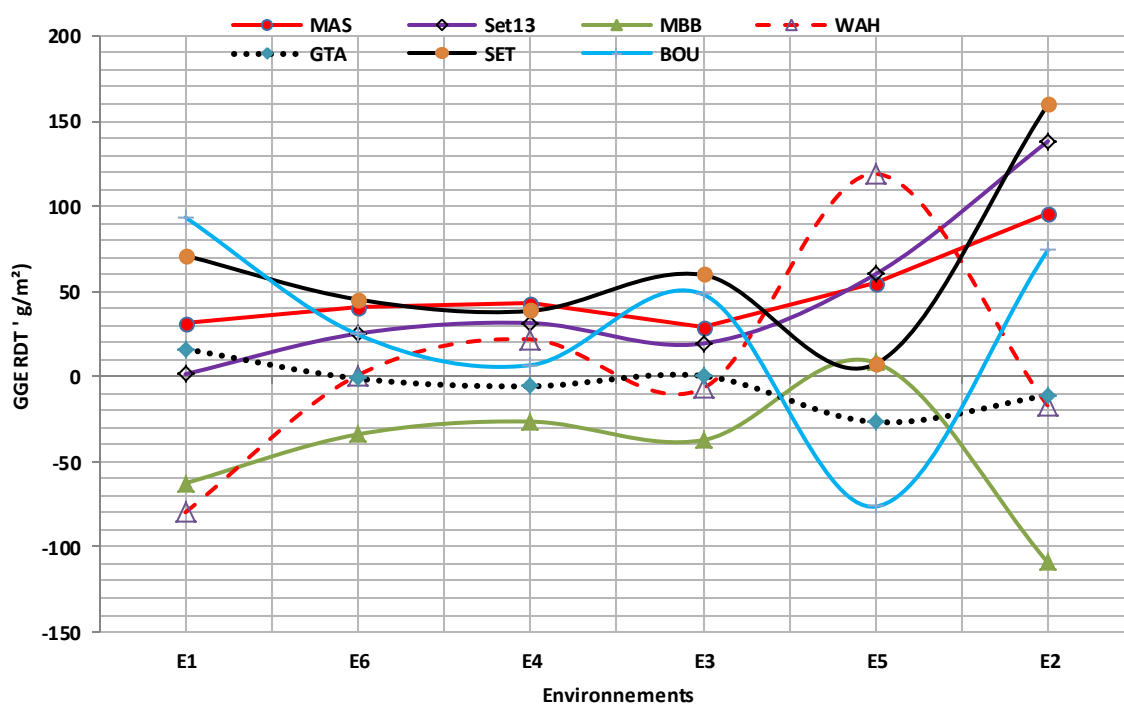
**Figure 31.** Performances et stabilité des différents génotypes (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG = Megress, SET= Setifis, BOU= Bouselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).

L'analyse de la figure 33 montre le comportement contrasté des cultivars Waha et Bouselam, les faibles potentialités de la variété locale MBB, la bonne stabilité et performance de Massara et à degré moindre celles de Sétif<sub>2013</sub>. Setifis est relativement moins stable mais il est plus performant sur au moins 5 environnements parmi les 6 testés ( Figure 33).





**Figure 32.** Performance (G+IGE) et stabilité [ $\sigma^2_{G+IGE} / \sigma^2_{(G+IGE)_{\text{mini}}}$ ] des différents génotypes évalués (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, Cyp2= Cyprus2, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, VIT= Vitron, MEG= Megress, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MAN= Mansoura, MAI= Massinissa, TJD= Tajdid, MOU= Moustakbel, BTA= Boutaleb).



**Figure 33.** Performance (G+IGE) des trois meilleurs génotypes pour le rendement en grains (Setifis, Sétif<sub>2013</sub> et Massara en comparaison avec les trois témoins (MBB, Waha et Bousselam) sur les 6 environnements testés (Mas= Massara, Set13= Sétif2013, MBB= Mohammed Ben Bachir, WAH= Waha, GTA= Gaviota durum, SET= Setifis, BOU= Bousselam).

Ces trois variétés méritent d'être sélectionnées pour être adoptées comme cultivars par la grande culture. En effet du point de vu sélection, et en présence d'interaction génotype x environnements, il est intéressant d'identifier les variétés qui produisent plus lors des années favorables et autant, dans les environnements moins favorables, que les témoins adoptés par la grande culture. Les génotypes Setifis, Sétif<sub>2013</sub> et Massara répondent à cette condition.

Selon Fox *et al.*, (1997) les études portant sur l'interaction génotype x environnements sont importantes pour :

- choisir entre la sélection pour l'adaptation spécifique ou l'adaptation générale,
- décider du type d'environnement (localité, année ou techniques culturales), le plus approprié et le plus discriminant, à utiliser pour le testage du matériel végétal soumis à la sélection
- décider du choix du matériel à tester, des lignées avancées ou des variétés révélatrices (probes) des phénomènes physiologiques, climatiques et/ou agro-écologique, mis en cause dans l'expression de l'interaction.

Dans les cas de la présente étude, la sélection a pour objectif l'adaptation générale vu que l'environnement est temporel, représenté par les années, la date de semis étant secondaire. Le matériel végétal testé est constitué de lignées avancées et de variétés témoins. Cependant les méthodes d'analyses de l'interaction ci-dessus discutées mettent l'accent plus sur le niveau des performances que sur le degré de stabilité.

Le potentiel de rendement ou performance est utile pour le sélectionneur alors que le producteur cherche la régularité des rendements et donc la stabilité des performances. Cet aspect de l'étude de l'interaction est abordé dans ce qui suit.

## **2.6. STABILITE DES PERFORMANCES DE RENDEMENT**

Les stress notamment abiotiques sont des facteurs qui déterminent principalement la rentabilité économique de la production des cultures et qui sont responsables des interactions entre génotype et environnement (Finlay et Wilkinson, 1963 ; Bouzerzour *et* Dekhili 1995 ; Hamam *et al.*, 2008). Ces interactions sont une source de préoccupations pour les sélectionneurs car elles masquent les effets génotypiques et ralentissent le progrès génétique réalisable (Fox *et al.*, 1990 ; Amokrane *et al.*, 2002 ).

L'étude de l'interaction permet de décider de la stratégie de sélection à retenir soit la sélection pour l'adaptation générale ou la sélection pour l'adaptation spécifique, stratégie liée, selon Ramagosa et Fox, (1993), à la stabilité du rendement dans une gamme limitée ou large d'environnements. Pour Brancourt-Hulmel *et al.*, (2003), la stabilité du rendement est un critère important pour le développement de cultivars destinés à des milieux variables.

Ainsi pour avoir plus de chance d'être adopté comme cultivar, tout nouveau génotype doit se caractériser par un haut potentiel de rendement et l'adaptation à une large gamme d'environnements (Sinebo *et al.*, 2004 ; Akcura *et al.*, 2006). De ce fait l'évaluation de la stabilité et de l'adaptation sont de plus en plus ciblées dans les programmes de sélection végétale.

Dans ce contexte un certain nombre d'indices de stabilité ont été développés et sont proposés pour étudier la stabilité des rendements mesurés dans un ensemble d'environnements (Kiliç *et al.*, 2010 ; Mohammadi et Amri, 2011).

Sur les hautes plaines orientales, le blé dur est cultivé sous diverses conditions qui sont le plus souvent contraignantes, notamment au niveau des zones centre et sud, et qui conditionnent la détermination du rendement final de cette culture, en termes de performances et d'adaptation.

Le développement de variétés pour ces régions doit cibler deux objectifs qui ne sont pas, le plus souvent, positivement associés et qui sont le potentiel et la régularité ou stabilité des rendements en grains (Kadi *et al.*, 2010).

La présence de l'interaction génotype x environnements du rendement (Adjabi *et al.*, 2014), et même des caractères qui en sont les déterminants (Meziani, 2016), suggèrent de conduire les essais de comportement sous diverses conditions pour évaluer ces deux paramètres ou caractéristiques (Nouar *et al.*, 2012 ; Adjabi *et al.*, 2014).

### **2.6.1. MOYENNE DES PERFORMANCES DE RENDEMENT**

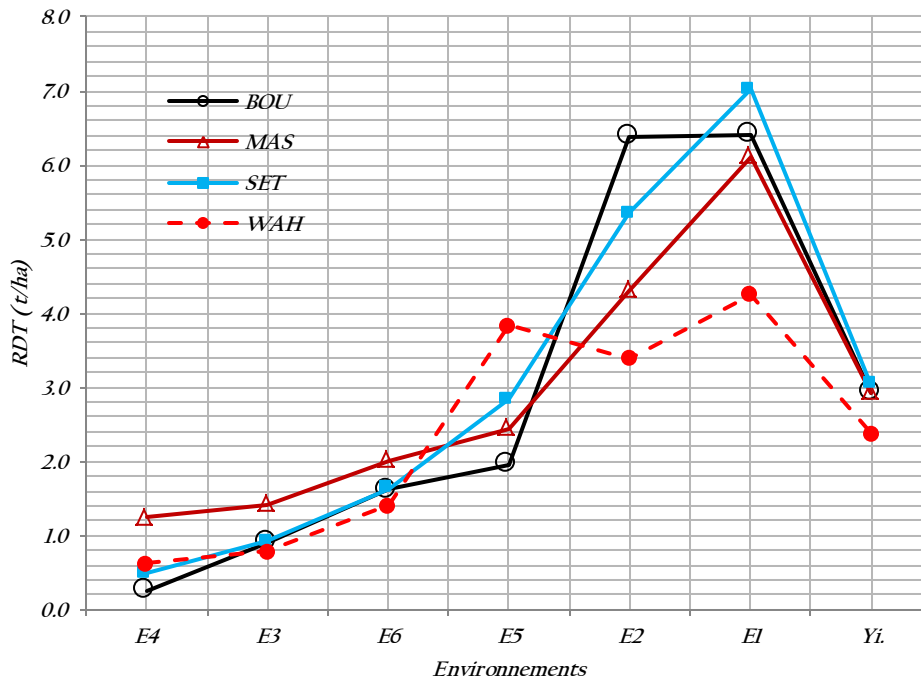
La moyenne des performances d'un génotype dans un ensemble d'environnements peut être utilisée comme indicateur de la stabilité et de la performance. Ceci n'est vrai que si la meilleure moyenne des performances indique la supériorité du génotype considéré au niveau de tous les environnements tests.

L'étude des moyennes des performances indique que le génotype Setifis présente la meilleure moyenne des performances (3.04 t/ha, Tableau 14), mais que ce génotype n'est pas le plus performant au niveau de tous les environnements tests, donc moins régulier ou instable.

En effet, ce génotype doit cette performance moyenne à son bon comportement en E1 où il réalise un rendement supérieur à 7.0 t/ha. Cette performance élevée masque les faibles rendements réalisés par ce génotype en E3, E4 et E6 où il est moins performant que Massara, dont la moyenne des rendements est de 2.92 t/ha.

Setifis présente un rendement significativement inférieur à celui de Waha, dont la moyenne des rendements est de 2.38 t/ha, dans l'environnement E5 et un rendement inférieur à celui de Bouselam, dont la moyenne des rendements est de 2.92 t/ha, dans l'environnement E2 (Figure 34, Tableau 14).

Ces résultats suggèrent que la moyenne des performances dans un ensemble d'environnements n'est pas toujours un critère d'appréciation de la stabilité, mais il l'est pour la performance moyenne du génotype considéré.



**Figure 34.** Performances des quatre génotypes pour le rendement en grains (Setifis, Bouselam, Waha et Massara dans les 6 environnements tests (MAS= Massara, WAH= Waha, SET= Setifis, BOU= Bouselam).

## 2.6.2. VARIANCE ENVIRONNEMENTALE ( $S^2_{env}$ )

Les valeurs prises par la variance environnementale varient de 1.54, variance de Cyprus2 à 7.59 variance de Bouselam. Après Cyprus2, Waha et MBB sont les moins variables d'un environnement à l'autre alors que Setifis et Mansoura sont les plus variables après Bouselam (Tableau 14). Ce paramètre indique que les génotypes qui présentent des rendements en grains, assez voisins, d'un environnement à l'autre, indépendamment de leur potentiel de performance, sont les plus stables.

Cette caractéristique du génotype à produire des rendements réguliers, indépendamment des potentialités du milieu, est une mesure de la stabilité de type biologique (Lin *et al.*, 1986). De tels génotypes ne répondent généralement pas à la

fertilité des milieux et de ce fait ne sont pas d'intérêt pour le sélectionneur (Benmahammed *et al.*, 2010).

**Tableau 14.** Valeurs des différences indices de stabilité et de performance du rendement en grains (t/ha) des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements.

Var	Yi.	S <sup>2</sup> env	Wi	Shukla $\sigma^2_i$	Pi	CV (%)	ASV	Top	Mid	Bot
BOU	2.92	7.59	4.37	4.36	0.45	94.23	13.58	0.33	0.33	0.33
BTA	2.68	4.87	0.18	-0.04	0.63	82.38	5.58	0.33	0.33	0.33
CYP2	2.17	1.54	0.43	-0.01	2.04	57.22	15.26	0.50	0.00	0.50
GTA	2.56	4.13	0.00	-0.05	0.84	79.34	3.50	0.17	0.50	0.33
MAI	2.53	3.02	1.03	0.19	0.97	68.67	3.02	0.33	0.50	0.17
MAN	2.29	5.99	4.36	4.34	1.34	106.68	13.63	0.17	0.17	0.67
MAS	2.92	3.65	2.41	1.29	0.59	65.33	4.33	0.83	0.17	0.00
MBB	2.14	2.46	0.11	-0.05	1.63	73.25	7.35	0.00	0.33	0.67
MEG	2.53	2.95	0.01	-0.05	1.20	67.80	8.13	0.50	0.33	0.17
MOU	2.44	5.01	0.72	0.07	1.09	91.58	9.67	0.33	0.33	0.33
SET	3.04	6.83	0.52	0.01	0.27	85.94	9.04	0.50	0.33	0.17
Sét13	2.74	4.78	0.61	0.03	0.72	79.75	9.34	0.33	0.50	0.17
TJD	2.03	2.91	0.99	0.17	1.84	84.13	10.32	0.00	0.17	0.83
VIT	2.66	4.62	0.43	-0.01	1.01	80.72	10.74	0.50	0.33	0.17
WAH	2.38	2.65	0.49	0.00	1.50	68.40	15.63	0.17	0.17	0.67

### 2.6.3. ECOVALENCE ( $W_i$ )

Le calcul de l'écovalence est basé sur les valeurs de l'interaction G x E du génotype considéré. Ce paramètre mesure la stabilité de type 2 (stabilité de type dynamique) selon Lin *et al.*, (1986). Sur la base de ce paramètre, les génotypes les moins réactifs à la variation de l'environnement sont Gaviota durum et Megress, à l'opposé de Bousselam, Mansoura et Massara qui sont les plus réactifs à la variation environnementale, et qui présentent des interactions GxE significatives.

### 2.6.4. VARIANCE DE SHUKLA ( $\sigma^2_i$ )

La variance de Shukla est déduite à partir des résidus du modèle additif, elle est donc assez similaire à l'écovalence dont le calcul est basée sur l'interaction GxE. Ce paramètre est une mesure de la stabilité. Selon Becker et Leon, (1988),  $\sigma^2_i$  est

l'équivalente de  $W_i$  et de ce fait ces deux paramètres classent de manière similaire les performances génotypiques. Sur la base de ce paramètre Mansoura et Massara sont les moins stables et les autres génotypes sont relativement plus stables, notamment Gaviota durum et MBB (Tableau 14).

#### ***2.6.5. INDICE DE SUPERIORITE GENOTYPIQUE ( $P_i$ )***

La supériorité génotypique est déterminée par la somme des carrés des distances entre la performance du génotype considéré et celle du meilleur génotype par environnement, pour tous les environnements. Un cultivar stable et performant présente une faible valeur pour cet indice. Selon Lin et Binns (1988) l'indice  $P_i$  représente la supériorité globale d'un génotype, et ce fait c'est un indicateur de l'adaptabilité.

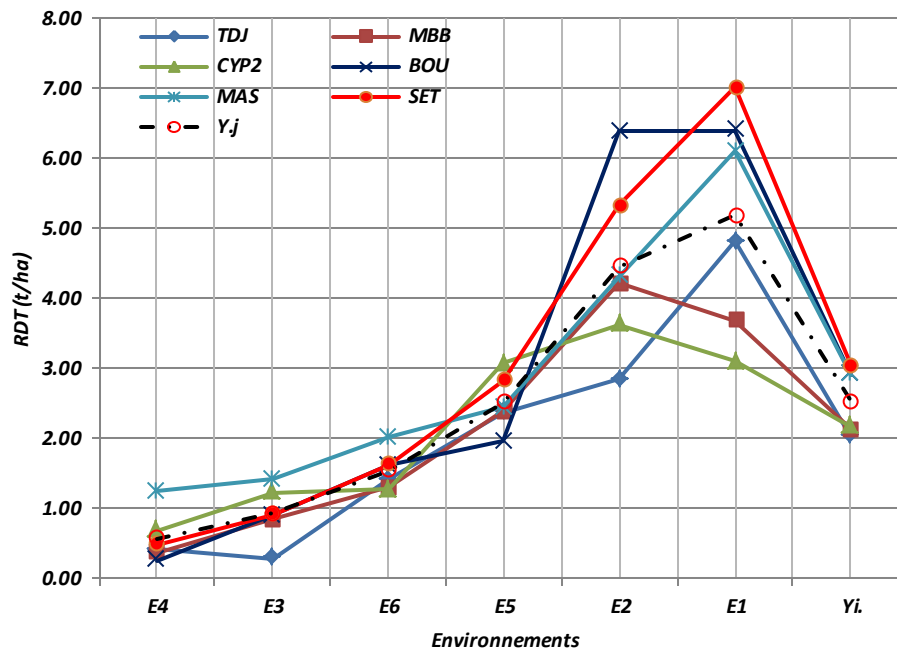
Sur la base des valeurs prises par cet indice, les génotypes Setifis, Bousselam et Massara sont adaptés, c'est-à-dire performants et stables, présentant des valeurs de  $P_i$  inférieures à 0.6 ; alors que les génotypes Cyprus<sub>2</sub>, Tajdid et MBB sont moins adaptés (performances faibles et irrégulières) et présentent des valeurs de  $P_i$  supérieures à 1.6 (Tableau 14).

Les différences de comportement entre ces deux groupes de génotypes sont plus évidentes dans des environnements fertiles et le sont moins sous stress ou dans des environnements contraignants comme le suggère la figure 35.

#### ***2.6.6. COEFFICIENT DE VARIATION ( $C_v$ %)***

Le coefficient de variation représente l'écart type exprimée en % de la moyenne des rendements des environnements tests pour un génotype donné. Les valeurs élevées de ce paramètre sont donc indicatrices d'une variabilité inter-environnements des rendements élevée. Plus la valeur du  $C_v(\%)$  est élevé plus la variété est instable.

Les valeurs de ce paramètre, observées dans le cadre de la présente étude, varient de 57.2% pour Cyprus2 à 106.7% pour Mansoura (Tableau 14). Ainsi Massara, Waha, MBB et Gaviota durum présentent des Cv relativement plus faibles, comparativement aux valeurs de ce paramètre notées chez les variétés Bousselam, Setifis et Tajdid, entre autres, qui se montrent moins régulières dans le temps (Tableau 14).



**Figure 35.** Performances de rendement en grains des groupes de génotypes adaptés et non adaptés sur la base de l'indice de supériorité génotypique Pi dans les 6 environnements tests (MAS= Massara, Cyp<sub>2</sub>= Cyprus<sub>2</sub>, SET= Setifis, BOU= Bousselam, MBB= Mohamed Ben Bachir, TJD = Tajdid).

### 2.6.7. VALEUR DE LA STABILITE AMMI (ASV)

L'ASV est un paramètre destiné à classer les génotypes évalués selon la stabilité de leurs performances dans les différents environnements. Il représente la distance entre la position du génotype considéré sur le plan formé par les axes IPCA1 et IPCA2 à l'origine de ces axes. Comme les variétés, dont les scores sont élevés, sont instables suite à leur réactivité élevée en fonction des environnements, les faibles valeurs de l'ASV sont donc indicatrices de la stabilité.



Ce paramètre a été utilisé par plusieurs chercheurs pour identifier les génotypes stables aussi bien chez le blé, que le riz ou le maïs (Purchase *et al.*, 2000 ; Das *et al.*, 2010 ; Farshadfar *et al.*, 2011). Les valeurs prises par ce paramètre dans le cadre de cette étude varient de 3.02 pour Massinissa à 15.6 pour Waha (Tableau 14).

En plus de Massinissa, les variétés les plus stables sont Gaviota durum (3.5), Massara (4.3), et Boutaleb (5.6). Celles qui sont relativement instables pour le rendement en grains sont Cyprus2 (15.3), Mansoura (13.6), et Bousselam (13.6), en plus de Waha (Tableau 14).

#### **2.6.8. INDICES DE FOX ET al., (1990)**

Les variétés dont les rendements réalisés figurent plus dans la classe inférieure ou Bot sont MBB (67%), Tajdid (83%), Mansoura (67%) et Waha (67%). Ces variétés sont faiblement performantes (Tableau 14). Les variétés dont les rendements sont plus présents dans la classe Top sont Massara (83%), Vitron (50%), Setifis (50%) et Megress (50%). Les rendements de Bousselam, Boutaleb et Moustakbel sont équitablement répartis dans les trois classes Top, Mid et Bot à raison de 33% des cas (Tableau 14).

Cyrus2 présente cette particularité de se classer pour moitié dans la classe Top et pour l'autre moitié dans la classe Bot. Gaviota durum, Massinissa, et Sétif<sub>2013</sub> présentent 50% de leurs rendements en grains dans la classe Mid (Tableau 14).

Pour ce paramètre les variétés adaptées sont celles qui répartissent régulières leurs performances dans les trois classes, celles qui sont plus présentes dans la classe Bot sont mal adaptées et non performantes, alors que celles qui sont plus présentes dans la classe Top sont performantes et instables.

#### **2.6.9. SOMME DES RANGS DE KANG ( $S_{rank}$ )**

Les valeurs de la somme des rangs des rendements en grains des différentes variétés dans les différents environnements varient de 36 à 84, valeurs prises par,

respectivement, Massara et Mansoura (Tableau 15). Les valeurs élevées sont suggestives de l'instabilité des performances alors que celles qui sont faibles sont indicatrices de la stabilité. Cet indice ne donne aucune idée sur les performances de rendement en tant que tel. Dans ce contexte les variétés qui sont relativement plus stables sont Massara, Boutaleb, Setifis, Sétif<sub>2013</sub> et Vitron, alors que celles qui sont instables sont Waha, MBB, Tajdid et Mansoura (Tableau 15).

**Tableau 15.** Valeurs des différences indices de stabilité et de performance du rendement en grains (t/ha) des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements.

Var	Srank	StI	Bajpai's I	SuI	RYi	YSI	Di
BOU	60.00	0.00	218.02	2.403	0.98	17.00	6.65
BTA	43.00	0.24	23656.06	6.717	1.04	14.00	8.64
CYP2	54.00	0.95	94620.86	13.220	1.00	21.00	11.03
GTA	50.00	0.95	94621.01	7.531	0.97	13.00	6.08
MAI	53.00	0.05	4883.04	11.292	1.05	7.00	10.89
MAN	84.00	0.00	218.87	-2.184	0.76	28.00	2.55
MAS	36.00	0.01	733.79	14.435	1.33	4.00	8.45
MBB	72.00	0.19	18924.84	8.148	0.84	17.00	8.27
MEG	48.00	0.19	18925.00	11.618	1.13	14.00	9.51
MOU	62.00	0.14	13920.56	2.932	0.90	22.00	10.13
SET	43.00	1.02	101842.05	6.087	1.09	9.00	9.11
Sét13	43.00	0.30	29564.52	7.902	1.08	11.00	3.54
TJD	83.00	0.06	5511.46	4.584	0.74	24.00	8.02
VIT	43.00	0.95	94621.05	7.307	1.10	20.00	6.83
WAH	66.00	0.95	94620.94	10.713	0.99	19.00	5.57

### ***2.6.10. INDICE DE STABILITE (StI)***

Les valeurs de cet indice varient de 0 à 1.02 pour des rendements exprimés en t/ha. Les géotypes qui présentent de faibles valeurs (< 0.05) pour cet indice sont Bousselam, Mansoura et Massara, entre autres, alors que celles qui présentent des valeurs relativement élevées (> 0.90) sont cyprus2, Gaviota durum, Vitron, Waha et Setifis (Tableau 15).

### ***2.6.11. INDICE DE STABILITE DE BAJPAI'S (BAJPAI'S I)***

Les valeurs de cet indice varient de 218.02 pour Bousselam à 101842.05 pour Setifis. Les géotypes qui présentent de faibles valeurs pour cet indice sont Bousselam, Mansoura et Massara, entre autres, alors que celles qui présentent des valeurs relativement élevées sont Cyprus2, Gaviota durum, Vitron, Waha et Setifis (Tableau 15).

Le classement des géotypes évalués sur la base de cet indice est similaire au classement fait sur la base de l'indice StI de Rao *et al.*, (2004). Selon Bajpai et Prabhakaran, (2000) cet indice tient compte de la performance et de la stabilité, simultanément. Il donne aussi la possibilité de faire varier le poids à donner à la stabilité relativement à la performance de rendement. Dans la présente étude la valeur du poids donné à la stabilité est de  $\psi=0.25$ .

#### ***2.6.12. INDICE DE DURABILITE (SuI)***

Les valeurs de l'indice de durabilité, proposé par Babarmanzoor *et al.*, (2009), subdivisent la durabilité des performances des géotypes évalués, en deux groupes à très faible (< 20%) et à faible (>20 et <40%) durabilité (Tableau 15). Le groupe à faible durabilité est constitué des variétés Waha, Massinissa, Megress, cyprus2 et Massara. Le reste des variétés appartiennent au groupe à très faible durabilité (Tableau 15).

Il est important de noter que cet indice ne discrimine pas entre les variétés évaluées pour la performance de rendement dans la mesure où des variétés performantes comme Setifis et Bousselam figurent dans la classe de très faible durabilité au même titre que des variétés très peu performantes comme Tajdid et Mansoura (Tableaux 13 et 15).

Dans ce contexte Oliviera *et al.*, (2014), analysant la durabilité des performances de production du jus de citron, mentionnent que les valeurs de cet indice augmentent en fonction de la productivité, suggérant que les géotypes les plus performants sont

les moins stables (durables). Par contre Farshadfar *et al.*, (2011) ainsi que Mladenov *et al.*, (2012) rapportent que cet indice n'est pas efficace dans la discrimination des génotypes de blé pour la performance de rendement ni pour la stabilité.

### **2.6.13. RENDEMENT RELATIF (RY)**

Selon Yau et Hamblin (1994), l'avantage de cet indice est qu'il donne un poids égal à tous les environnements tests, en prenant la performance moyenne de chaque environnement comme indice 100, évitant l'effet des valeurs observées qui sont biaisées par les rendements des environnements performants.

Cinq variétés, présentent des rendements supérieurs à 105% sur l'ensemble des environnements tests. Ces variétés sont Massinissa (105%), Sétif<sub>2013</sub> ( 108%), Setifis (109%), Vitron ( 110%), Megress (113% ) et Massara ( 133%).

Des variétés témoins, adoptées par la grande culture, comme Waha, MBB et Bouselam présentent des rendements inférieurs à 100% ; suggérant qu'elles doivent être remplacées, sur la base de cet indice, par des génotypes plus adaptés comme Massara, Megress ou Setifis

### **2.6.14. INDICE DE STABILITE DU RENDEMENT (YSI)**

Selon Kang et Pham (1991), l'indice YSI est une mesure concomitante de la performance et de la stabilité et que la sélection sur la base de cet indice réduit les difficultés induites par la sélection sur la base du rendement en grains qui identifie des génotypes instables et peu fiables pour la recommandation à la grande culture.

L'utilisation de cet indice est suggérée par Oliveira et Godoy (2006) ainsi que par Pazdernik *et al.*, (1997). Cependant Bajpai et Prabhakaran (2000) mentionnent que cet indice donne plus de poids à la performance de rendement en grain qu'à la stabilité. Les faibles valeurs de cet indice sont indicatrices de génotypes désirables associant performance et stabilité.

Sur la base de cet indice les meilleurs génotypes du point de vu stabilité et performance sont Massara (YSI= 4), Massinissa (YSI= 7), Setifis (YSI= 9), et Sétif<sub>2013</sub> (YSI= 11), alors que ceux qui sont indésirables sont Vitron (YSI= 20), Cyprus<sub>2</sub> (YSI= 21), Moustakbel (YSI= 22), Tajdid (YSI= 24), et Mansoura (YSI= 28) (Tableau 15).

### ***2.6.15. INDICE DE DESIRABILITE DE HERNANDEZ (Di)***

L'indice Di de Hernandez *et al.*, (1993) est une combinaison entre le coefficient de régression (bi) et la moyenne des performances du génotype considéré (Yi.) dans l'ensemble des environnements tests. Cet indice combine donc stabilité et performance. Les génotypes Mansoura, Sétif<sub>2013</sub>, Waha, Gaviota durum, Bousselam et Vitron prennent les plus faibles valeurs de l'indice Di ; alors que Cyprus<sub>2</sub>, Massinissa, Moustakbel, Megress et Setifis prennent les valeurs les plus élevées (Tableau 15).

### ***3. RELATIONS ENTRE LA PERFORMANCE DE RENDEMENT ET LES VALEURS DES INDICES***

Un indice fiable doit identifier les génotypes stables et performants pour réaliser un progrès en sélection. En fait la performance de rendement est beaucoup plus le souci du sélectionneur qui cherche à apporter un plus en terme de rendement, alors que pour le producteur, c'est surtout la régularité des rendements qui est importante et qui est la base de la prise de décision pour le choix et l'adoption d'une variété nouvelle.

L'analyse des coefficients de corrélation de rangs de Spearman a été utilisée pour étudier les relations entre les performances de rendement et les valeurs des indices de stabilité (Tableau 16). La lecture des coefficients laisse apparaitre que la performance de rendement (Yi.) est liée, positivement, avec la variance environnementale ( $S^2_e$ ), la fraction Top(Top), et le rendement relatif (RY) et négativement avec l'indice de la supériorité génotypique (Pi), la fraction Bot (Bot), la somme des rangs (Sr) et l'indice de stabilité du rendement (YSI).

**Tableau 16.** Coefficients de corrélation de rangs de Spearman entre le rendement et les valeurs des indices des 15 variétés de blé dur évaluées dans 6 environnements (Coefficients au-dessous et probabilité au-dessus de la diagonale).

Indice	S <sup>2</sup> e	Wi	$\sigma^2$ i	Pi	CV	ASV	Top	Mid
Yi.	0.65	0.16	0.18	-0.96	0.14	-0.32	0.60	0.42
Prob	0.01	0.58	0.52	0.00	0.62	0.25	0.02	0.12
Indice	Bot	Sr	StI	Baj	SuI	RY	YSI	Di
Yi.	-0.78	-0.80	0.11	0.15	-0.03	0.67	-0.69	-0.06
Prob	0.00	0.00	0.70	0.60	0.91	0.01	0.00	0.84

La performance de rendement en grains n'est pas liée significativement avec les valeurs des indices suivants : l'écovalence de Wrikle (Wi), la variance de Shukla ( $\sigma^2$ i), le coefficient de variation (Cv%), l'AMMI Stability Value (ASV), l'indice de Bajpai (I Baj), la fraction Mid (Mid), l'indice de Prabhakaran (StI), l'indice de durabilité (SuI), et l'indice de désirabilité de Hernandez (Di) (Tableau 16).

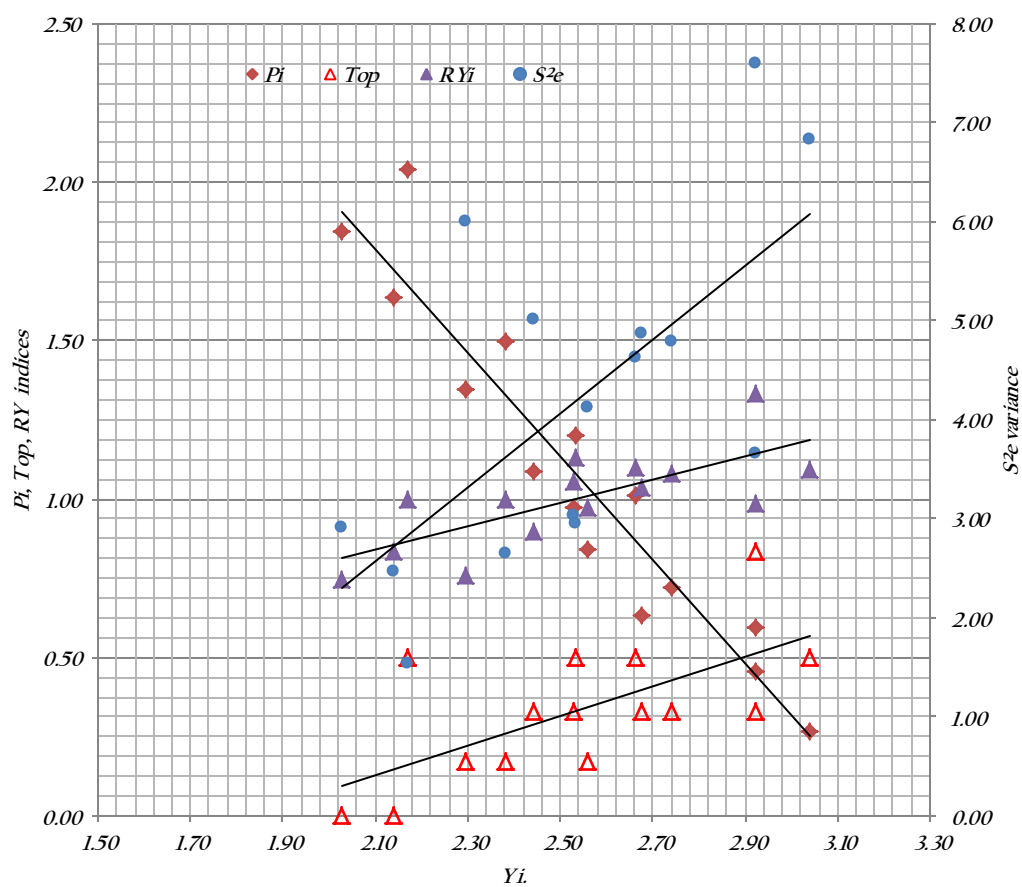
YSI renseigne, simultanément, sur la performance de rendement du génotype considéré et sur le degré de sa stabilité. L'indice S<sup>2</sup>e indique que les génotypes performants sont irréguliers, dans le sens de la stabilité statique, à l'inverse de ceux qui sont peu performants (Tableau 16, Figure 36). Ceci est le cas de Bousselam et Setifis vs Cyprus<sub>2</sub> et MBB. Cependant pour un même niveau de rendement, on peut trouver des génotypes de stabilités différentes ; comme c'est le cas de Bousselam et de Massara (Tableau 14).

L'indice Top indique que les génotypes, dont une plus grande fraction des rendements obtenus dans les différents environnements est classée dans la classe Top, sont performants et stables, dans le sens de stabilité agronomique, c'est à dire qu'ils répondent à la fertilité des lieux ou environnements (Tableau 16, Figure 36). Ceci est le cas de Massara dont les rendements des différents environnements se classent, pour 83% des cas, dans la classe top (Tableau 14).

Pour des fréquences relativement plus faibles, à 50%, cet indice ne discrimine pas, entre les génotypes, pour la performance de rendement en grains. Ainsi, Cyprus<sub>2</sub>

présente le même degré de stabilité que Setifis, avec des rendements extrêmes de 2.17 vs 3.04 t/ha (Tableau 14).

L'indice RY indique que globalement les génotypes performants sont aussi stables. Cependant les valeurs élevées de cet indice ne correspondent pas forcément aux rendements moyens les plus élevés. Ceci est le cas de Vitron dont le score est de 110% avec une moyenne de rendement de 2.66 t/ha vs Setifis dont le score est de 109% pour une moyenne de rendement de 3.04 t/ha (Tableau 14, Figure 36).

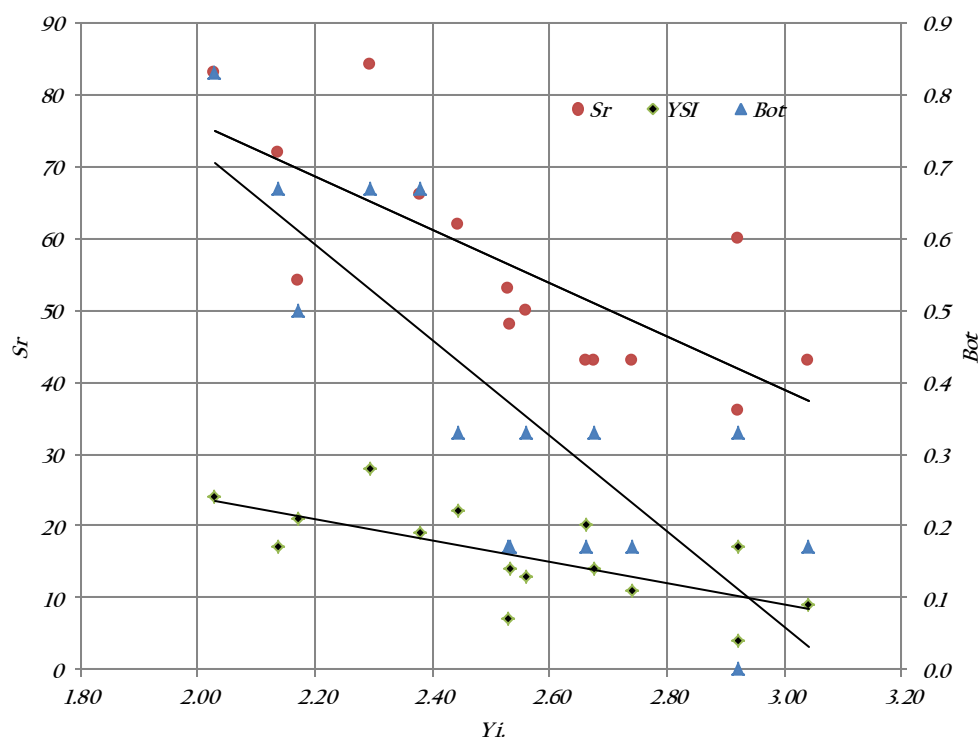


**Figure 36.** Relations entre la moyenne des performances des rendements des différents génotypes dans les différents environnements et les indices de stabilité  $S^2_e$ , Top, RY et Pi.

La relation de l'indice Pi avec la moyenne des performances suggère que les génotypes performants sont stables et se caractérisent par de faibles valeurs pour cet

indice (Figure 36, Tableau 16). Cet indice indique que les génotypes qui ont été identifiés sur la base de la moyenne des rendements comme performant (Setifis) et non performant (Cyprus<sub>2</sub>), sont, respectivement, stable et instable.

Les liaisons des indices Bot, Sr, et YSI avec la moyenne des performances de rendement en grains indiquent que les valeurs élevées sont notées chez les génotypes peu performants (Tableau 16, Figure 37).



**Figure 37.** Relations entre la moyenne des performances des rendements des différents génotypes dans les différents environnements et les indices de stabilité Bot, Sr et YSI.

Comme le calcul de ces indices est basé sur la fréquence des rendements observés ou la somme des rangs des rendements, les faibles valeurs sont donc indicatrices de la stabilité. Dans ce contexte Tajdid, Mansoura, MBB et Waha sont déclarés instables et peu performants, alors que Massara, Massinissa, Megress, Setifis, Vitron et Sétif<sub>2013</sub> sont déclarés stables et performantes sur la base de l'indice Bot (Tableaux 14 et 15).



Ces mêmes groupes de géotypes sont aussi déclarés comme étant, respectivement, instables et peu performants et stables et performants sur la base de l'indice Sr. L'indice YSI classe Massara, Setifis, Massinissa et Sétif<sub>2013</sub> comme stables et performants et Tajdid, Mansoura, Cyprus<sub>2</sub> et Moustakbel comme instables et peu performants (Tableaux 14, 15, et 16).

La performance de rendement en grains n'est pas liée significativement avec les valeurs de l'écovalence de Wricke ( $W_i$ ), La variance de Shukla ( $\sigma^2_i$ ), le coefficient de variation (Cv%), l'Ammi Stability Value (ASV), l'indice de Bajpai (I Baj), la fraction Mid (Mid), l'indice de stabilité de Prabhakaran (StI), l'indice de durabilité (SuI), et l'indice de désirabilité de Hernandez (Di) (Tableau 16). Ces indices sont donc indépendants de la performance de rendement en grains.

Les résultats de la présente étude indiquent que certains indices dont la variance environnementale ( $S^2_e$ ), la fraction top (Top), le rendement relatif (RY), l'indice de la supériorité génotypique (Pi), la fraction bot (Bot), la somme des rangs (Sr) et l'indice de la stabilité du rendement (YSI) informent sur la stabilité et la performance.

Par contre l'écovalence de Wricke ( $W_i$ ), la variance de Shukla ( $\sigma^2_i$ ), le coefficient de variation (Cv%), l'Ammi Stability Value (ASV), l'indice de Bajpai (I Baj), la fraction Mid (Mid), l'indice de Prabhakaran (StI), l'indice de durabilité (SuI), et l'indice de désirabilité de Hernandez (Di) informent uniquement sur le degré de stabilité indépendamment de la performance.

Le phénotype du blé dur apparait comme la résultante de l'interaction entre l'expression des gènes et l'effet de l'environnement. Cette interaction réduit de l'association entre les valeurs phénotypiques et géotypiques. Ceci introduit un biais dans l'estimation du gain génétique exprimé par un individu donné pour un caractère donné, notamment pour les caractères complexes comme le rendement en grains (Becker and Léon, 1988).

De tels caractères répondent difficilement à la sélection, ce qui complique l'identification des génotypes supérieurs (Farshadfar *et al.*, 2000 ; Fellahi *et al.*, 2016). Un génotype supérieur est vu différemment par le sélectionneur et par le producteur. Le premier cible la performance de rendement alors que le second privilégie surtout la régularité ou la stabilité des performances. Ces deux paramètres sont le plus souvent difficilement associés.

Plusieurs méthodes statistiques, sous forme d'indices, sont proposées pour étudier l'interaction et notamment identifier les génotypes stables et performants (Lin *et al.*, 1986; Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Mohammadi *et al.*, 2010, Benmahammed *et al.*, 2010 ; Adjabi *et al.*, 2016).

L'inconvénient des indices proposés est qu'ils ne rendent pas compte entièrement de la complexité de la variation de la réponse du caractère ciblé selon les environnements. En effet l'interaction est de nature multi-variée alors que les indices sont des paramètres uni-variés dont le calcul est basé sur le rendement uniquement (Lin *et al.*, 1986).

Annichiarico *et al.*, (2006), mentionnent que pour réduire des effets de l'interaction du rendement en grains, il faut sélectionner des génotypes stables dans l'espace et dans le temps. Dans ce contexte l'utilisation des indices n'est pas efficace. En effet le même génotype est classé comme stable par un indice et instable par un autre indice. Il en est de même pour le classement de la performance de rendement en grains, certains indices classe un génotype comme performant alors que d'autres le classe autrement (exemple de Setifis, Tableaux 14 et 15).

Les résultats de la présente étude suggèrent que les différents indices expliquent différents phénomènes relatifs à l'interaction, notamment le type de stabilité (statique vs agronomique) qui est variable selon l'indice considéré. Il est nécessaire de passer donc par une typologie des indices et des variétés.

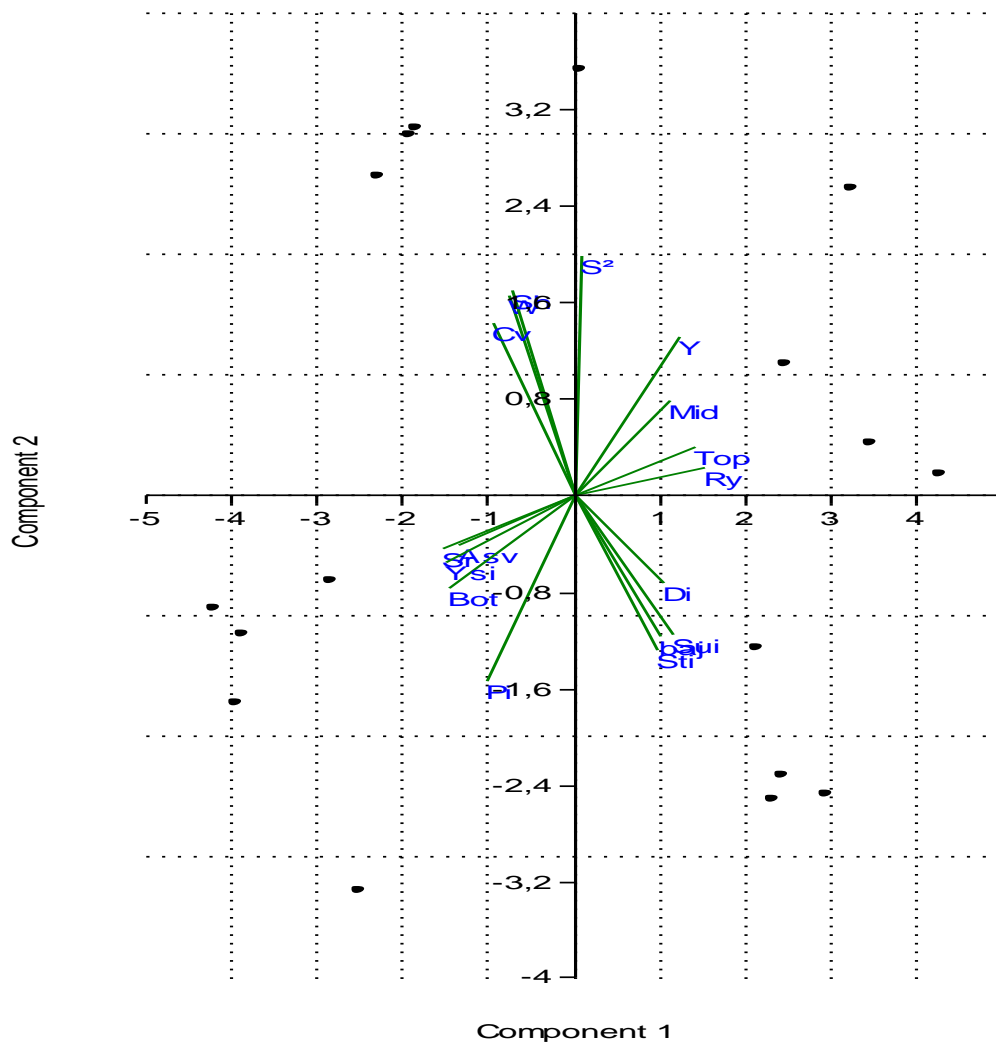
#### 4. TYPOLOGIE DES INDICES

Les deux premières composantes de l'ACP issues de la matrice des coefficients de rangs de Spearman expliquent 83.45%, soit 53.48, et 29.96% respectivement pour les axes 1 et 2. L'étude des corrélations des indices avec les composantes principales indique que la première composante est une représentation des indices  $Y_i$ , Top, Mid, Baj, Sui, RY, Di, YSI, ASV, Bot et Sr (Tableau 17, Figure 38).

Les indices  $Y_i$ , Top, Mid, Baj, SuI, RY et Di sont positivement liés à l'axe 1, alors que les indices YSI, ASV, Bot et Sr, lui sont négativement liés (Tableau 17). La première composante est donc une représentation de la moyenne des performances associées aux indices calculés sur la base de l'ordre de classement. A la seconde composante sont liées positivement les indices  $S^2e$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2$ , CV et négativement les indices  $P_i$ , et StI. Cette composante est donc une représentation des indices basés sur les écarts de l'interaction GxE ou les écarts par rapport au meilleur.

**Tableau 17.** Coefficients de corrélation des indices avec les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales.

	Axis 1	Axis 2
$Y_i$	0.763	0.621
Top	0.885	0.188
Mid	0.692	0.375
Baj	0.626	-0.553
Sui	0.712	-0.551
Ry	0.962	0.111
Di	0.641	-0.346
Ysi	-0.943	-0.263
Asv	-0.853	-0.195
Bot	-0.920	-0.366
Sr	-0.968	-0.211
$S^2$	0.042	0.938
W	-0.481	0.785
Sh ( $\sigma^2_i$ )	-0.461	0.804
Cv	-0.612	0.673
Sti	0.597	-0.611
Pi	-0.663	-0.733



**Figure 38.** Plan formé par les composantes principales 1 et 2 des indices de stabilité des performances de rendement.

Le calcul des indices liés au rendement en grains est basée sur le classement des performances, soit en termes relatifs (Top, Mid, Bot, RY) ou absolus (Srank, YSI) ou le classement relatif, corrigé pour la contribution à la variance inter environnements ou à l'interaction GxE (Di, ASV, Baj's I, SuI).

Par contre le calcul des indices non liés au rendement en grains ( $S^2_e$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2_{Shukla}$ , CV, Pi et StI) est basé sur la contribution génotypique à la somme des carrés de l'interaction, corrigée pour l'effet environnement ou la déviation de la référence.

L'efficacité de discrimination pour la performance et la stabilité est approchée par la comparaison des valeurs prises par les indices liés au rendement qui caractérisent les génotypes aux performances extrêmes (Tableau 18). En ce qui concerne l'ASV, globalement, les faibles valeurs de cet indice sont la caractéristique des génotypes à haut potentiel de rendement, alors que les valeurs élevées sont la caractéristique des génotypes à faible potentiel (Tableau 18).

Des exceptions à cette règle sont cependant notées. Ainsi sur la seule base de la faible valeur de l'ASV, le cultivar MBB serait classé comme étant performant et stable, alors qu'en réalité ce génotype n'est pas performant. Il en est de même pour le génotype Bousselam, dont la valeur de l'indice ASV est élevée, suggérant que ce génotype est peu performant et instable, alors qu'en réalité ce génotype est classé comme performant.

**Tableau 18.** Valeurs prises par les indices liés au rendement des génotypes aux performances extrêmes.

Génotype	Yi.	ASV	Top	S <sub>rank</sub>	Bajp I	SuI	RYi	YSI	Di
Génotypes à faible potentiel de rendement									
TJD	2.03	10.32	0.00	83	5511.5	10.6	0.74	24	8.02
MBB	2.14	7.35	0.00	72	18924.8	18.8	0.84	17	8.27
CYP2	2.17	15.26	0.50	54	94620.9	30.5	1.00	21	11.03
MAN	2.29	13.63	0.17	84	218.9	5.0	0.76	28	2.55
WAH	2.38	15.63	0.17	66	94620.9	24.7	0.99	19	5.57
Génotypes à haut potentiel de rendement									
BTA	2.68	5.58	0.33	43	23656.1	15.5	1.04	14	8.64
Sét <sub>2013</sub>	2.74	9.34	0.33	43	29564.5	18.2	1.08	11	3.54
BOU	2.92	13.58	0.33	60	218.0	5.5	0.98	17	6.65
MAS	2.92	4.33	0.83	36	733.8	33.3	1.33	4	8.45
SET	3.04	9.04	0.50	43	101842.1	14.1	1.09	9	9.11

Ces résultats suggèrent une utilisation prudente de cet indice pour identifier les génotypes performants et stable. Les mêmes constatations sont observées pour l'indice TOP, dont globalement les faibles valeurs sont indicatrices des faibles performances et de l'instabilité au contre des valeurs élevées. Ainsi pour une valeur de 50%, un génotype est faiblement performant (Cyprus2) alors qu'un autre présente un haut

potentiel de rendement (Setifis). Les valeurs de cet indice au-dessus de 50% sont les plus discriminantes (Tableau 18).

L'indice  $S_{rank}$  montre les mêmes faiblesses que l'indice TOP. Globalement les faibles valeurs de cet indice sont indicatrices de performance et de stabilité élevées, au contraire des valeurs élevées. Cependant on note des exceptions ou des valeurs relativement plus faibles sont associées à une faible performance et des valeurs élevées sont associées à des performances plus importantes. Ceci est le cas des génotypes Cyprus<sub>2</sub> et Bousselam (Tableau 18).

Les mêmes constations sont notées pour les indices Bajp's I, SuI, RY, YSI et Di. Ces résultats suggèrent une utilisation prudente de ces indices pour la sélection de génotypes performants et stables. En effet, selon l'indice utilisé, des génotypes non performants et instables peuvent faire l'objet de sélection, alors que des génotypes stables et performants peuvent faire l'objet de refus.

L'analyse de l'efficacité de discrimination, entre stabilité et performance, des indices qui ne présentent pas de liaisons avec rendement montre que hormis l'indice Pi qui identifient les génotypes stables et performants des génotypes instables et non performants, les autres indices identifient et caractérisent la stabilité indépendamment de la performance (Tableau 19).

Ainsi parmi les génotypes à faible performance Cyprus<sub>2</sub> est stable et Mansoura et instable selon l'indice  $S^2_{env}$  ; et parmi les génotypes performants, Massara est stable et Bousselam est instable. L'indice Wi identifie MBB et Mansoura parmi les génotypes non performants, comme stable et instable, respectivement ; et parmi les génotypes performants, Boutaleb et Bousselam, comme stable et instable, respectivement. Les indices  $\sigma^2_{Shukla}$ , CV et StI présentent aussi les mêmes caractéristiques et identifient les génotypes stables parmi ceux qui sont performants et ceux qui sont peu performants (Tableau 19).

**Tableau 19.** Valeurs prises par les indices non liés au rendement des génotypes aux performances extrêmes.

Var	Yi.	S <sup>2</sup> env	Wi	Shukla $\sigma^2_i$	Pi	CV (%)	StI
Génotypes à faible rendement							
TDJ	2.03	2.91	0.99	0.17	1.84	84.13	0.06
MBB	2.14	2.46	0.11	0.05	1.63	73.25	0.19
CYP2	2.17	1.54	0.43	0.01	2.04	57.22	0.95
MAN	2.29	5.99	4.36	4.34	1.34	106.68	0.00
WAH	2.38	2.65	0.49	0.00	1.50	68.40	0.95
Génotypes à haut rendement							
BTA	2.68	4.87	0.18	0.04	0.63	82.38	0.24
Sét13	2.74	4.78	0.61	0.03	0.72	79.75	0.30
BOU	2.92	7.59	4.37	4.36	0.45	94.23	0.00
MAS	2.92	3.65	2.41	1.29	0.59	65.33	0.01
SET	3.04	6.83	0.52	0.01	0.27	85.94	1.02

Ces résultats indiquent que les indices sont séparables en deux groupes, selon le type de stabilité recherchée, dynamique ou statique. Les premiers associent, plus ou moins, la performance de rendement au degré de stabilité de type dynamique, alors que les seconds révèlent la stabilité, de type statique, indépendamment de la performance (Figure 38).

Parmi ces indices, seul l'indice Pi évite le risque de sélectionner un génotype stable et non performant ou d'éliminer un génotype performant et stable au cours du processus de sélection. Cet indice montre une relation très étroite avec la performance, ce qui fait dire à Mohammadi *et al.*, (2012) que cet indice donne plus de poids à la performance qu'à la stabilité.

Les résultats de cette étude corroborent partiellement ceux rapportés par Changizi *et al.*, (2014). Ces derniers comparent divers indices de stabilité chez les maïs, ils observent que ces indices se regroupent globalement selon le type de stabilité, statique vs dynamique, avec une subdivision selon le degré d'association avec la performance. Ces auteurs mentionnent que parmi les indices étudiés seuls Pi et Di montrent une étroite liaison avec la capacité de rendement et de ce fait ils sont conseillés pour la sélection de génotypes performants et à large adaptation.

Mohammadi *et al.*, (2010) observent une liaison étroite entre Pi et le rendement et suggèrent cette indice pour la sélection de génotypes stables et performants, pour une meilleure exploitation de l'interaction GxE. Les résultats de la présente étude corroborent ceux de Mohammadi *et al.*, (2012) et ceux de Karimzadeh *et al.*, (2012) qui mentionnent que les indices  $S^2_{env}$ ,  $\sigma^2$  Shukla, CV%, et  $W_i$  sont suggérés pour la sélection de génotypes stables indépendamment de la performance de rendement.

Temesgen *et al.*, (2015) rapportent que les indices Pi et TOP sont discriminants et efficaces pour la sélection des génotypes stables et performants. Ces auteurs suggèrent que les indices CV%,  $S^2_{env}$ ,  $W_i$  et la  $\sigma^2$  Shukla doivent être utilisés en complémentarité pour identifier les génotypes stables, sans perdre de vue l'information sur la performance de rendement des génotypes sélectionnés.

Dans cette étude, les résultats de l'indice Pi identifient le génotype Setifis comme le plus performant et stable alors que l'indice TOP suggère le génotype Massara (Tableaux 18 et 19). Ces deux génotypes apportent un gain de rendement de 42% et 35% relativement au rendement du témoin MBB.



# *CONCLUSION*

## **CONCLUSION**

Les résultats de cette étude, qui a été conduite au cours de trois années, divergentes pour la répartition mensuelle et saisonnière des pluies, avec quinze génotypes de blé dur, testés en deux dates de semis, précoce et tardive, indiquent des effets moyens année, génotype et date de semis et des interactions significatives pour l'ensemble des 13 caractères analysés. Les valeurs prises par les variables mesurées varient fortement selon les années accusant des réductions de 20% à 80% des valeurs maximales observées au cours de la campagne favorable. Les caractères les plus variables sont le rendement en grains, la biomasse aérienne, le nombre de grains par m<sup>2</sup>, le poids des épis, le nombre de grains par épi, et la hauteur de la plante, suggérant que la variation inter environnements n'est pas spécifique au rendement en grains mais touche presque tous les caractères constituant l'architecture de la plante.

Des différences importantes apparaissent entre les génotypes testés, en réponse à la variation du milieu, suggérant les possibilités de sélection au sein de l'échantillon de variétés étudiées pour améliorer les caractères d'intérêts. Les résultats indiquent qu'il est possible de réduire de la durée de la phase végétative de 10%, d'améliorer, entre autre, la biomasse aérienne de 56% et le rendement en grains de 40%. Les génotypes évalués se classent en deux groupes qui diffèrent essentiellement pour le rendement en grains, les nombres de grains par épi et par m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne et le poids des épis, qui sont à l'avantage du groupe constitué de Massara, Waha, Setifis, Gaviota durum, Sétif<sub>2013</sub>, Vitron et Bouselam.

Quoique des différences de réponses à la date de semis existent entre les génotypes testés, l'analyse de la date de semis comme environnement indique que le semis précoce présente un avantage significatif, notamment pour les variables qui sont les déterminantes du rendement en grains, comparativement au semis tardif pour presque l'ensemble des variables mesurées, dont l'avantage de soustraire une

partie du cycle de la plante aux effets pénalisants des stress abiotiques de fin de cycle de la culture. Ces résultats suggèrent que l'adoption du semis précoce et la sélection de génotypes qui s'expriment mieux en semis précoce, améliore les performances de rendement en grains et contribue à mieux valoriser l'interaction génotype x dates de semis.

Du point de vu importance des sources de variation du rendement en grains, les différences entre années, dates de semis, génotypes et l'interaction GxE expliquent, respectivement, 84.3%, 1.6%, 2.4% et 11.6% de la somme des carrés des écarts des traitements. Ceci indique que l'effet année et l'interaction GxA sont les principales sources de variation du rendement et de ce fait il est conseillé d'augmenter le nombre d'années de testage au détriment du nombre de dates de semis pour mieux cerner l'adaptabilité des génotypes à sélectionner.

La régression conjointe explique 37.2% des 11.6% de la somme des carrés des écarts de l'interaction GxE se montrant peu efficace avec 62.8% de la SCE restant inexpliqués. Ce modèle suggère que seuls Cyprus<sub>2</sub>, Setifis et Bouselam présentent des pentes significativement différentes de l'unité. Cyprus<sub>2</sub> présente une adaptation aux environnements, plutôt peu fertiles, alors que Bouselam et Setifis s'adaptent mieux aux environnements aux hautes potentialités.

Le modèle AMMI expliquent 92.1% de la SCE de l'interaction soit 2.5 fois plus que la régression conjointe. Ce modèle indique que les génotypes Setifis, Bouselam et Massara sont les plus performants à l'inverse de Tajdid, MBB et Cyprus<sub>2</sub> qui sont les moins performants. Waha, Cyprus<sub>2</sub>, Bouselam, Mansoura, Vitron et Moustakbel interagissent fortement avec les environnements testés. Le rendement nominal départage les environnements testés en deux domaines de recommandation, où Setifis performe dans 5 sur 6 environnements et Waha sur un seul environnement.

Les résultats de l'analyse des corrélations entre les scores du rendement en grains sur l'IPCA<sub>1</sub> et les moyennes génotypiques des caractères morphologiques indiquent

que le nombre d'épis et le poids des épis contribuent significativement à l'interaction GxE du rendement, ce qui suggère que, pour réduire de l'IGE du rendement, il faut garder sous contrôle la variation, inter environnements, de ces caractères, qui doit être la plus faible possible.

Le modèle GGE explique 73.4 % de la SCE des effets GGE du rendement et identifie 5 environnements potentiels typiques dont trois sont représentés parmi les six environnements testés. Quatre environnements ont la même capacité de discrimination des performances génotypiques, et sont, de ce fait, des doubles de l'environnement potentiel. Ce modèle indique que Massara est performant et stable.

Les différents indices de stabilité calculés sont séparables en deux groupes, selon le type de stabilité recherchée, dynamique ou statique. Les premiers associent, plus ou moins, la performance de rendement au degré de stabilité de type dynamique, alors que les seconds révèlent la stabilité, de type statique, indépendamment de la performance. Parmi ces indices, seul l'indice  $P_i$  évite le risque de sélectionner un génotype stable et non performant ou d'éliminer un génotype performant et stable au cours du processus de sélection. Cet indice montre une relation très étroite avec la performance de rendement. Dans cette étude, cet indice identifie Setifis comme le plus performant et stable alors que l'indice TOP suggère le génotype Massara. Ces deux génotypes apportent un gain de rendement de 42% et 35% relativement au rendement du témoin MBB.

# *Perspectives*

## ***PERSPECTIVES***

L'étude suivante a été menée dans le but d'analyser l'interaction Génotype x Milieux du blé dur à travers les modèles AMMI et GGE. Et elle a permis d'identifier certains facteurs explicatifs de cette interaction, ce qui aidera à diriger et à cibler la sélection variétale de cette culture pour atteindre des objectifs de stabilité et de performance des rendements.

Seulement cette étude s'est basée sur quelques variables ou caractères d'ordre phéno-agromorphologiques, ce qui reste insuffisant. Comme le but de l'amélioration des plantes est de rassembler ou de réunir dans une même variété le maximum de gènes favorables. Il est donc important de tisser une architecture de gènes pour mettre en place un génome favorable pour lutter contre les stress biotiques et/ou abiotiques induits par des facteurs environnementaux contraignants, il est important que les études ultérieures cherchent à élargir le champs d'expertise des caractères qu'ils soient d'ordre morphologiques, agronomiques, biochimiques, physiologiques, moléculaires et sans pour autant oublié les aspects technologiques. Toujours dans ce contexte, il serait aussi intéressant d'exploiter une plus grande variabilité génétique intra-spécifique du blé dur pour avoir plus de chance d'utiliser des caractères génotypiques favorables.

Pour appuyer et mener à bien l'analyse de l'interaction GXE, plusieurs outils et moyens sont à considérer; d'abord il est nécessaire d'élargir le réseau d'essais variétaux par l'augmentation du nombre d'environnements, temporels (années) et spatiales (sites ou localités), afin d'avoir une information plus précise et exacte sur les causes explicatives de l'interaction GXE, qui sont reproductibles donc répétables et ceux qui sont imprévisibles.

Egalement, les outils biométriques constituent aujourd'hui un moyen quasi déterminant mis au service, notamment, de l'analyse IGE ainsi que la stabilité des performances. Mais il reste toujours à faire des choix judicieux de ces outils. Mener des études approfondies sur les tests et les modèles biométriques existant, permettrait de déterminer ceux qui sont en mesure d'apporter des explications non biaisées et fiables à partir desquelles le choix des variétés et des caractères destinées à la sélection en dépendrait.

Enfin et pas finalement, les outils issus de la biologie moléculaire et des biotechnologies constitueraient sans doute un complément d'étude à explorer pour l'analyse de l'interaction GXE du blé dur.

*REFERENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUES*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abbassenne F., H. Bouzerzour, L. Hachemi. 1998. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride. *Ann. Agron. INA*, 18: 24-36.
2. Adjabi A., H. Bouzerzour, C. Lelarge, A. Benmahammed, A. Mekhlouf, A. Hanachi. 2007. Relationships between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean conditions. *Journal of Agronomy*, 6: 294-301.
3. Adjabi A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2014. Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Grain Yield. *Journal of Agronomy*, 13: 131-139.
4. Adjabi A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2016. Study of the Effects of Physiological Trait Selection on the Yield potential in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) under Semiarid Conditions. *Advances in Environmental Biology*, 10(5): 153-163.
5. Adjel F., Z. Kadi, H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2013. Salt Stress Effects on Seed Germination and Seedling Growth of Barley (*Hordeum Vulgare* L.) Genotypes. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 3: 223-237.
6. Akçura M., Y. Kaya, S. Taner. 2006. Evaluation of durum wheat genotypes using parametric and non-parametric stability statistics. *Turkish J. of Field Crops*, 14: 111-122.
7. Ali MA., M. Ali, M. Sattar, L. Ali. 2010. Sowing Date Effect on Yield of Different Wheat Varieties. *J. Agri. Res*, 48(2): 157-162.
8. Allard RW., AD. Bradshaw. 1964. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. *Crop Science*, 4: 503-508.
9. Amokrane A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, Djekoun A. 2002. Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie, Université Mentouri Constantine. Numéro spécial D, 33-38.
10. Anderson NP. 2010. Wheat on the Wet Side: A Look at Up and Coming Trends Related to the Extent of Soft White Wheat Production in the Willamette Valley. Morrow County Annual Wheat Grower's Meeting. Ione, OR.
11. Annicchiarico P. 2002. Genotype x Environment Interactions - Challenges and Opportunities for Plant Breeding and Cultivar Recommendations. FAO *Plant Production and Protection Paper* No. 174. Food and Agriculture Organization, Rome. 115 p.



12. 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 Sci*, 45: 1741-1749.
13. Annicchiarico P., F. Bellah, 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. Agron*, 24: 70-81.
14. Araus JL., G. Slafer, C. Royo, MD. Serret. 2008. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27: 377-412.
15. Ashraf M., NA. Akram, RN. Arteca, MR. Foolad. 2010. The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. *Crit. Rev. Plant Sci*, 29: 162-190.
16. Aslani F., MR. Mehrvar. 2012. Response of Wheat Genotypes as Affected by Different Sowing Dates. *Asian J. Agric. Sci*, 4(1): 72 – 74.
17. Asseng S., SP. Milory, ML. Poole. 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment: I Yield potential and quality. *Field Crop Res*, 105: 97-106.
18. Sourour A., A. Othmani, N. Chaieb, S. Bechrif, M. Rezgui, M. Ben Younes. 2016. Assessment Of Adaptability And Stability Of Six Tunisian Cereal Genotypes Under Rainfed Conditions And At Two Semi Arid Environments. *European Scientific Journal*, 12(6): 122-132.
19. Ayeneh A., A. Van Ginkel, MP. Reynolds, K. Ammar. 2002. Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. *Field Crops Research*, 79: 173-184.
20. Babarmanzoor A, MS. Tariq, A. Ghulam, A. Muhammad. 2009. Genotype x environment interaction for seed yield in Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes developed through mutation breeding. *Pak. J. Bot*, 41: 1883-1890.
21. Bahlouli F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, KL. Hassous. 2005. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Pak. J. Agron*, 4: 360-365.
22. Bajpai PK., VT. Prabhakaran. 2000. A new procedure of simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 60: 141-146.

23. Baker RJ. 1988. Analysis of genotype- environment interactions in crops. *ISI Atlas Sci. Animal and Plant Sci*, 1: 1-4.
24. Barbottin A. 2004. Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. Thèse de doctorat en agronomie. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 178p.
25. Baril CP. 1992. Factor regression for interpreting genotype-environment interaction in bread wheat trials. *Theor. Appl. Genet*, 83: 1022-1026.
26. Basford KE., M. Cooper. 1998. Genotype-environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Austr J Agric Res*, 49: 153-174.
27. Bassu, S., S. Asseng, R. Motzo, F. Giunta. 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 111: 109-118.
28. Bates BC., ZW. Kundzewicz, S. Wu, JP Palutikof. 2008. 'Climate Change and Water'. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC Secretariat.
29. Becker, HC, J. Leon. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant breed*, 101: 1-23.
30. Belaid A., N. Nsarellah, A. Laamari, M. Nachit , A. Amri. 2005. Assessing the economic impact of durum wheat research in Morocco. Aleppo, Syria: International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).
31. Belkharouch H., A. Benbelkacem, H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2015. Flag Leaf and Awns Ablation and Spike Shading Effects on Spike Yield and Kernel Weight of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. Var. *Durum*) Under Rainfed Conditions. *Advances in Environmental Biology*, 9: 184-191.
32. Belkharouch H. 2016. Analyse de la contribution des hydrates de carbone de la tige au remplissage du grain du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) sous conditions semi arides. Thèse de doctorat en sciences. Université de Sétif-1, 155 pages.
33. Benbelkacem A. 2013. Rapport des résultats du projet "Enhancing Food Security in Arab Countries' Icarda-INRAA. 35 pages.
34. Benchohra B., Khelloufi B. 2000. Impact du risque climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride : approche éco-physiologique. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 11 (1): 45-51.

35. Bendjamma A., H. Bouzerzour, A. Benbelkacem. 2014. Adaptability of Durum Wheat Genotypes (*Triticum turgidum* L. Var *durum*) to Contrasted Locations. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(6): 390-396.
36. Benin G., L. Storck, VS. Marchioro, MH. Todeschini, AS. Milioli, LG. Woyann. 2014. Effects of years, locations and sowing date on the spring wheat yield performance. *1Rev. Fac. Agron*, 113(2): 165-173.
37. Benmahammed A., H. Nouar, L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Bouzerzour. 2010. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 14(1): 177-186.
38. Blanche A., B Sterling, OM. Gerald, JZ. Zumba, D. Caldwell, J. Hayes. 2006. Stability comparisons between conventional and near-isogenic transgenic cotton cultivars. *J. Cotton Sci*, 10: 17-28.
39. Blum A. 1998. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilisation. *Euphytica*, 100: 77-83.
40. Bousba R., A. Djekoun, S. Duraa, N. Ykhlef. 2013. Caractérisation moléculaire et association marqueur SSR phénotype pour la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). *European Scientific Journal*, 9(12): 186-201.
41. Bousba R., Ykhlef N. & Djekoun A. 2009. Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf). *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(5): 609 -616.
42. Bouzerzour H., A. Adjabi, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, N. Harkati. 2002. Productivité et adaptation comparée des variétés de céréales en zone semi-aride d'altitude. *Céréaliculture*, 37(1) : 4-13.
43. Bouzerzour H., M. Dekhili. 1995. Heritabilities, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Res*, 41: 173-178.
44. Bouzerzour H., A. Djekoun, A. Benmahammed, 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 d'altitude. *Cahiers de l'Agriculture*, 8 : 133-137.
45. 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.

46. Brancourt-Hulmel M., JB. Denis, C. Lecomte. 2000. Determining environmental covariates which explain genotype x environment interaction in winter wheat through probe genotypes and biadditive factorial regression. *Theoretical and Applied Genetics*, 100: 285-298.
47. Brancourt-Hulmel M., V. Biarnès-Dumoulin, JB. Denis. 1997. Point de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Elsevier/Inra. Agronomie*, 17: 219-246.
48. Brancourt-Hulmel M., G. Doussinault, C Lecomte, P Berard, B Le Buanec, M Trottet .2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*, 43: 37-45.
49. Campos PS., V. Quartin, JC. Ramalho, MA. Nunes. 2003. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of Coffea sp. plants. *Journal of Plant Physiology*, 160: 283-292.
50. Ceccarelli S., S. Grando, A. Impiglia. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103: 307-318.
51. Ceccarelli S., S. Grando, M. Maatougui, M. Michael, M. Slash, R. Haghparast, M. Rahmanian, A. Taheri, A. Al-Yassin, A. Benbelkacem, M. Labdi, H. Mimoun, M. Nachit. 2010. Plant breeding and climate changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 148: 627-637.
52. Chabane M. 2010. L'agriculture de conservation : voie de sécurité alimentaire dans les pays du Maghreb. IV Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct, Option Méditerranéennes, A No, 96 : 189-208.
53. Changizi M., R. Choukan, EM. Heravan, MR. Bihamta, F. Darvish. 2014. Evaluation of genotypeenvironment interaction and stability of corn hybrids and relationship among univariate parametric methods. *Can. J. Plant Sci*, 94: 1255-1267.
54. Chennafi H., A. Aïdaoui, 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.
55. Christopher JT., AM. Manschadi, GL. Hammer, AK. Borrell. 2008. Developmental and physiological traits associated with high yield and stay-green phenotype in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59: 354-364.

56. Clarke JM., RM. De Pauw, TF. Townley-Smith. 1992. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci*, 32: 723-728.
57. Cossani CM., MP. Reynolds. 2012. Physiological Traits for Improving Heat Tolerance in Wheat. *Plant Physiology*, 160: 1710-1718.
58. Coventry DR., RK. Gupta, RS. Poswal, RS. Chhokar, RK. Sharma, VK. Yadav, SC. Gill, A. Mehta, SGL. Kleemann, A. Bonamano, JA. Cummins. 2011. Wheat quality and productivity as affected by varieties and sowing time in Haryana, *India. Field Crops Research*, 123(3): 214-225.
59. Crossa J. 1990. Statistical analysis of multi-location trials. *Adv Agron*, 44: 55-85.
60. Das S., RC. Misra, MC. Patnaik, SR. Das. 2010. GxE interaction, adaptability and yield stability of mid-early rice genotypes. *Indian J. Agric. Res*, 44: 104-111.
61. Debaeke P., P. Casadebaig, B. Haquin, E. Mestries, JP. Palteau, F. Salvi. 2010. Simulation de la réponse variétale du tournesol à l'environnement à l'aide du modèle SUNFLO. OCL - *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 17 : 143-151.
62. Dieng I. 2007. Prédiction de l'interaction génotype x environnement par linéarisation et régression PLS-mixte. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. 124p.
63. Ding M., B. Tier, W. Yan, H.X. Wu, MB. Powell, TA. McRae. 2007. Application of GGE biplot analysis to evaluate Genotype (G), Environment (E), and G×E interaction on *Pinus radiata*: a case study. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 38(1): 132-142.
64. Eastham J., PJ. Gregory, DR. Williamson, GD. Watson. 1999. The influence of early sowing of wheat and lupin crops on evapotranspiration and evaporation from the soil surface in a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 42: 205-218.
65. Eberhart S., WA. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci*, 6: 36-40.
66. El-Fakhri M, S. Mahboub, M. Benchekroun, N. Nsarellah. 2010. Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum durum* Desf). *Revue « Nature et Technologie »*, 03 : 06-12.
67. Elias EM., FA. Manthey. 2005. Durum wheat breeding at North Dakota State University. Pages 939-962. C. Royo, M.M. Nachit, N. DiFonzo, J.L. Araus, W.H. Pfeiffer, and G.A. Slafer eds. Food Products Press. New York.

68. Faostat. 2013. Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org>
69. Farshadfar E., M. Farshadfar, J. Sutka. 2000 Combining ability analysis of drought tolerance in wheat over different water regimes. *Acta Agron Hung*, 48(4): 353–361
70. Farshadfar E. 2008. Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pak. J. Biol. Sci*, 11: 1791-1796.
71. Farshadfar E., N. Mahmodi, A. Yaghotipoor. 2011. AMMI stability value and simultaneous estimation of yield and yield stability in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Aust. J. Crop Sci*, 5: 1837-1844.
72. Fatunla T., KJ. Frey. 1976. Repeatability and regression stability indexes for grain yield in oats (*Avena sativa* L.). *Euphytica*, 25: 21-28.
73. 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.
74. Fellahi ZEA., A. Hannachi, H. Bouzerzour, A. Boutekrab. 2013. Line × Tester Mating Design Analysis for Grain Yield and Yield Related Traits in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agronomy*, 9 pages.
75. Fellahi, ZEA., A. Hannachi, H. Bouzerzour, A. Benbelkacem. 2016. Inheritance Pattern of Metric Characters Affecting Grain Yield in Two Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Crosses Under Rainfed Conditions. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 8: 175-181.
76. Ferrise RM., M. Moriondo, M. Bindi. 2009. Climate change and projected impacts in agriculture: an example on Mediterranean crops. *Geophysical Research Abstracts*, 11: 2009-7229.
77. Feillet P. 2007. La nourriture des Français, De la maîtrise du feu ... aux années 2030, Editions QUAE, 245 pages.
78. Finlay KW., GH. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust.J.Agric.Res*, 14: 742-54.
79. Fox PN., J. Crossa, I. Romagosa. 1997. Multi-environment testing and genotype x environment interaction. In: Kempton, R.A. and Fox, P.N. (Eds). *Statistical methods for plant variety evaluation*. Chapman and Hall, London.
80. Fox PN., B. Skovmand, BK. Thompson, HJ. Braun, R. Cormier. 1990. Yield and adaptation of hexaploid spring triticale, *Euphytica*, 47: 57-64.

81. Francis TR., LW. Kannenberg. 1978. Yield stability studies in short-season maize: I. A descriptive method for grouping genotypes, *Can. J. Plant Sci*, 58: 1029-1034.
82. Gauch HG., RW. Zobel. 1996. AMMI analysis of yield trials .In: Genotype-by-Environment Interaction, Kang MS and HG Gauch (Eds.). Boca Raton CRE CRC, New York, USA, pp. 85-122.
83. Ghobadi M., S. Khosravi, D. Kahrizi, F. Shirvani. 2011. Study of Water Relations, Chlorophyll and their Correlations with Grain Yield in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 78: 582-585.
84. Gilbert J., A. Tekauz. 2011. Strategies for management of fusarium head blight (FHB) in cereals. *Prairie Soils Crops*, 4: 97–104.
85. Godfray HCJ., JR. Beddington, IR. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, JF. Muir, J. Pretty, S. Robinson, SM. Thomas, C. Toulmin. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327: 812-818.
86. Gouy M., S. Nibouche, JY. Hoarau, L. Costet. 2013. Improvement of yield per se in sugarcane. *Translational Genomics for Crop Breeding: Abiotic Stress, Yield and Quality. 2: 211-237.*
87. Gravois KA., KAK. Moldenhauer, PC. Rohman. 1990. Genotype by environment interaction for rice yield and identification of stable, high yielding genotypes, in Genotype by Environment Interaction and Plant Breeding (ed. M.S. Kang); Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, pp. 181-8.
88. Guerfel M., O. Baccouri, D. Boujnah, W. Chaibi, M. Zarrouk. 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Sci. Horticult*, 119: 257-263.
89. Guo Y., Y. Ma, Z. Zhan, B. Li, M. Dingkuhn, D. Luquet, P. De Reffye. 2006. Parameter optimization and field validation of the functional–structural model GREENLAB for maize. *Annals of Botany*, 97: 217–230.
90. Habash DZ., Z. Kehel. M. Nachit. 2009. Genomic approaches for designing durum wheat ready for climate change with a focus on drought. *Journal of Experimental Botany*, 60(10): 2805–2815.
91. Hamam K., A. Abdel-Sabour, GA. Khaled. 2008. Stability of wheat genotypes under different environments and their evaluation under sowing dates and nitrogen fertilizer levels. *Austr. J. Basic Appl. Sci*, 3: 206-217.

92. Hamblin MT., TJ. Close, PR. Bhat, S. Chao, JG. Kling, KJ. Abraham, T. Blake, WS. Brooks, B. Cooper, CA. Griffey. 2010. Population structure and linkage disequilibrium in US barley germplasm: implications for association mapping. *Crop Sci*, 50(2): 556–566.
93. Hamli S., M. Labhilili, K. Kadi, AEH. Kabthan, M. Tagouti, R. Kanzeri, M. Alyadini, H. Bouzerzour. 2015. Heat shock effects on fluorescence, membrane stability, chlorophyll content and metabolites accumulation in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) seedlings and relationships with stress tolerance indices. *Advances in Environmental Biology*, 6: 116-125.
94. Hamli, S. 2016. Contribution à l'étude de la tolérance du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) au choc thermique: criblage des plantules et déterminisme génétique de la tolérance. Thèse de doctorat en sciences. Université de Sétif-1, 134 p.
95. Hammer O., DAT. Harper, PD. Ryan. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4: 1-9.
96. Hernandez CM., J. Crossa, A. Castillo. 1993. The area under the function: an index for selecting desirable genotypes. *TAG*, 87: 409-415.
97. Hühn M. 1979. Beiträge zur Erfassung der phänotypischen stabilität. I. Vorschlag einiger auf Ranginformation beruhenden stabilitätsparameter. *EDV in Medizin und Biologie*, 10: 112-117.
98. Hussein MA., A. Bjornstad, AH. Aastveit. 2000. SASG 3 ESTAB: A SAS program for computing genotype 3 environment stability statistics. *Agronomy Journal*, 92: 454-459.
99. Ibrahim MY., HF. Kittani. 2009. A multivariate Analysis of the Effects of Planting Date on Productivity of Some Wheat Genotypes. *J. Sc. Tech*, 10(2): 46-59.
100. IGC: International Grains Council. 2013. World Grains Statistics. <http://www.igc.int/en/grainsupdate/sd.aspx?crop=Wheat>
101. IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report, Summary for Policy makers. Cambridge University Press. <http://www.ipcc.ch/>
102. Jackson PA. 2005. Breeding for improved sugar content in sugarcane. *Field Crops Research*, 92: 277-290.
103. Jalaluddin Md., SA. Harrison. 1993. Repeatability of stability estimators to grain yield in wheat. *Crop Science*, 33: 720-725.



104. Kadi Z. 2012. Sélection de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) pour la tolérance aux stress abiotiques. Thèse de doctorat en sciences « Biologie végétale », Faculté des sciences de la vie et de la nature Sétif-1, « Département d'écologie et biologie végétale », 126 pages.
105. 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: 30-40.
106. Kandus M., D. Almorza, R. Boggio Ronceros, JC. Salerno. 2010. Statistical methods for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Phy.Yld*, 39-46.
107. Kang MS. 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: Consequences for growers. *Agronomy Journal*, 85: 754-757.
108. Kang MS., HN. Pham. 1991. Simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. *Agron. J*, 83: 161–165.
109. Karimizadeh R., M. Mohammadi, N. Sabaghnia, MK. Shefazadeh. 2012. Using different aspects of stability concepts for interpreting genotype by environment interaction of some lentil genotypes. *Aust. J. Crop. Sci*, 6: 1017–1023.
110. Karrou M. 2000. Contribution à la mise en place d'une approche intégrée de lutte contre la sécheresse chez le blé dur au Maroc. Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges Zaragoza : CIHEAM Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40 : pages 559-567.
111. Khlestkina EK., EA. Salina. 2001. Genome- specific markers of tetraploid wheats and their putative diploid progenitor species. *Plant Breed*, 120: 227-232.
112. Kilic H., A. Mevlut, A. Husnu. 2010. Assessment of parametric and nonparametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in multi-environments. *Not. Bot. Horti Agrobo*, 38: 271–279.
113. Kimber G., ER. Sears. 1987. Evolution in the genus *Triticum* and the origin of cultivated wheat. In: *Wheat and Wheat Improvement*, 2nd Ed (Heyne EG, Ed.). American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 154-164.
114. Kribaa M. 2002. Effet de la jachère sur les sols de la céréaliculture pluviale des zones semi arides méditerranéennes « Cas des hautes plaines sétifiennes d'Algérie ». Thèse D'Etat, INA, El Harrach, Alger, 174p.
115. Kulshreshtha N., HM. Srivastava, PK. Bajpai. 2002. Simultaneous selection and stability under late planted commercial cane sugar. *Indian J. Genet*, 62(2): 143-145.

116. Laala Z., A. Oulmi, T. Saraoui, L. Haddad, H. Nouar, A. Benmahammed, H. Bouzerzour. 2009. Effet de la sélection de la biomasse et des épis sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur*, 1(4): 56- 69.
117. Lahmar R., H. Bouzerzour. 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 quatrièmes rencontres méditerranéennes du semi direct ». Sétif, 3-5 mai 2010. *Recherches agronomiques*, N0° Spécial, INRAA, p 48-58.
118. Leon J., HC. Becker. 1988. Repeatability of some statistical measures of phenotypic stability-correlations between single year results and multi years results. *Plant Breeding*, 100: 137-142.
119. Levitt J. 1982. Responses of plants to environmental stresses. Vol.2, water, radiation, salt and other Stresses. Academic press , New York, 607p.
120. Lin CS., Binns MR. 1991. Genetic properties of four types of stability parameter. *Theor. Appl. Genet*, 82: 505-509.
121. Lin CS., MR. Binns, LP. Lefkovitch. 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop Science*, 26: 894-900.
122. Lin CS., MR. Binns. 1988. A method of analyzing cultivar x location x year experiments: a new stability parameter. *Theor Appl Genet*, 76: 425-430
123. Lopez-Castañeda C., RA. Richards, GD. Farquhar, RE. Wiliamson. 1996. Seed and seeding characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Science*, 36: 1257-1266.
124. Ludwig F., S. Asseng. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems*, 90: 159-179.
125. Magari R., MS. Kang. 1993. Genotype selection via a new yield-stability statistic in maize yield trials. *Euphytica*, 70: 105-111.
126. Magari R., MS. Kang. 1997. SAS-STABLE: stability analyses of balanced and unbalanced data. *Agron.J*, 89: 929-932.
127. Manschadi AM., GL. Hammer, JT. Christopher, P. DeVoil. 2008. Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil*, 303: 115–129.

128. Mekhlouf A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, N. Harkati. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse*, 17(4): 507-13.
129. Menad A., N. Meziani, H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 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 & Technologie*, 5: 99-106.
130. Meziani N., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Menad. 2011. Performance And Adaptation of Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to Diverse Locations. *Advances in Environmental Biology*, 5(7): 1465-147.
131. Meziani N. 2016. Analyse génétique des caractères physiologiques liés au rendement en conditions de stress hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. ENSA El Harrach, Alger, 130 pages.
132. Mitrovic B., D. Stanisavljevi, S. Treski, M. Stojakovic, M. Ivanovic, G. Bekavac, M. Rajkovic. 2012. Evaluation of experimental Maize hybrids tested in Multi-location trials using AMMI and GGE biplot analysis. *Turkish J. Field Crops*, 17: 35-40.
133. Mladenov V., B. Banjac, M. Milošević. 2012. Evaluation of yield and seed requirements stability of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) via AMMI model. *Turk. J. Field Crops*, 17: 203-207.
134. Mohammadi R., M. Mozaffar Roostaei, A. Yousef, A. Mostafa, A. Amri. 2010. Relationships of phenotypic stability measures for genotypes of three cereal crops. *Canadian J. Plant Sci*, 90: 819-830.
135. Mohammadi R., A. Amri. 2011. Analysis of genotype x environment interactions for grain yield in durum wheat. *Crop Sci*, 49: 1177-1186.
136. Mohammadi M., R. Karimizadeh, T. Hosseinpour, FH. Ali, H. Khanzadeh, N. Sabaghnia, P. Mohammadi, M. Armion, MH. Hosni. 2012. Genotype × environment interaction and stability analysis of seed yield of durum wheat genotypes in dry land conditions. *Not. Sci. Biol*, 4: 57-64.
137. Morgan JM. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Plant Physiol*, 35: 299-319.
138. Motzo R., F. Giunta, G. Pruneddu. 2010. The Response of Rate and Duration of Grain Filling to Long-Term Selection for Yield in Italian Durum Wheats. *Crop and Pasture Science*, 61: 162-169.

139. Munns R., JA. James, B. Xu, A. Athman, SJ. Conn, C. Jordans, CS. Byrt, RA. Hare, SD. Tyerman, M. Tester, D. Plett, M. Gilliam. 2012. Wheat grain yield on saline soils is improved by an ancestral Na<sup>+</sup> transporter gene. *Nature Biotechnology*, 30: 360 - 364.
140. Nachit, MM., G. Nachit, H. Ketata, HG. Gauch, R.W. Zobel. 1992. Use of AMMI and linear regression models to analyse genotype-environment interaction in durum wheat. *Teoret. Appl. Genet*, 83: 597-601.
141. Nachit, MM., I. Elouafi. 2004. Durum adaptation in the Mediterranean dryland: breeding, stress physiology, and molecular markers. In: Rao SC, Ryan J, eds. Challenges and strategies for dryland agriculture. CSSA Special Publication 32. Madison, Wisconsin, USA: *Crop Science Society of America Inc., American Society of Agronomy Inc*, 203–218.
142. Nassar R., M. Hühn. 1987. Studies on estimation of phenotypic stability: Test of significance for nonparametric measures of stability. *Biometrics*, 43: 45-53.
143. Navabi A., M. Iqbal, K. Strenzke, D. Spaner. 2006. The relationship between lodging and plant height in a diverse wheat population. *Canadian Journal of Plant Science*, 86: 723–726.
144. 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.
145. 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: 23-28.
146. Nouar H. 2015. 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. Thèse de doctorat sciences, Université de Sétif-1, 140 p.
147. Oliveira EJ., J. Godoy. 2006. Pod yield stability analysis of runner peanut lines using AMMI. *Crop Breed. Appl. Biotechnol*, 6: 311-317.
148. Oliveira EJ., JP. Xavier de Freitas, ON. De Jesús. 2014. AMMI analysis of the adaptability and yield stability of yellow passion fruit varieties. *Sci. Agric*, 71 : 139-145.
149. Onfaa : Observatoire National des Filières Agricoles et Agro-Alimentaires (MADR). 2016. <http://onfaa.inraa.dz/>

150. Ouk M., J. Basnayake, M. Tsubo, S. Fukai, KS. Fischer, S. Kang, S. Men, V. Thun, M. Cooper. 2007. Genotype-by environment interactions for grain yield associated with water availability at flowering in rainfed lowland rice. *Field Crops Research*, 101: 145-154.
151. Oukarroum A., G. Schansker, RJ. Strasser. 2009. Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. *Physiologia Plantarum*, 137: 188-199.
152. Parry M., C. Rozenzweig, M. Livermore. 2005. Climate change, global food supply and risk of hunger. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 360: 2125–2138.
153. Pask A., J. Pietragalla, D. Mullan, M. Reynolds. 2012. Physiological Breeding II: A Field Guide to Wheat Phenotyping. Mexico DF: CIMMYT.
154. Pazdernik DL., LL. Hardman, JH. Orf. 1997. Agronomic performance of soybean varieties grown in three maturity zones of Minnesota. *J. Production Agric*, 10: 425-430.
155. Plaut Z., BJ. Butow, CS. Blumenthal, CW. Wrigley. 2004. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, 86: 185-198.
156. Prost L., C. Lecomte, JM. Meynard, M. Cerf. 2007. Conception d'un outil d'analyse du comportement de systèmes biologiques: le cas de l'évaluation des variétés de blé tendre. *Activités*, 4: 30-53.
157. Prowse TAA., BW. Brook. 2011. Climate change, variability and conservation impacts in Australia. *Pacific conservation biology*, 17: 168-178.
158. Purchase JL., H. Hatting, CS. Van Deventer. 2000. Genotype x environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *S. Afr. J. Plant Soil*, 17: 101-107.
159. Quasim M., M. Qamer, M. Alam. 2008. Sowing dates effect on yield and yield components of different wheat varieties. *J. Agric. Res*, 46: 135-140
160. Rad NM., MA. Kadir, MY. Rafii, HZ. Jaafar, MR. Naghavi, F. Ahmadi. 2013. Genotype x environment interaction by AMMI and GGE biplot analysis in three consecutive generations of wheat (*Triticum aestivum*) under normal and drought stress conditions. *Aust. J. Crop Sci*, 7: 956-961.

161. Ramagosa I., PN. Fox, LF. Garcia Del Moral, JM. Ramos, B. Garcia Del Moral, F. Roca De Togoies, JL. Molina-Cano. 1993. Integration of statistical and physiological analyses of adaptation of near-isogenic barley lines. *Theoret. Appl. Genet*, 86: 822-826.
162. Rao AR., VT. Prabhakaran, AK. Singh. 2004. Development of Statistical Procedures for Selecting Genotypes Simultaneously for Yield and Stability. IASRI Publication.
163. Rebetzke GJ., AG. Condon, RA. Richards, GD. Farquhar. 2002. Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Science*, 42: 739-745.
164. Rebetzke GJ., AR. Rattey, GD. Farquhar, RA. Richards, AG. Condon. 2012. Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in wheat. *Functional Plant Biology*, 40(1): 14-33.
165. Rebetzke GJ., RA. Richards, NA. Fettell, M. Long, AG. Condon, TL. Acuna. 2007. Genotypic increases in coleoptiles length improves wheat establishment, early vigour and grain yield with deep sowing. *Field Crops Res*, 100: 10-23.
166. Reynolds MP., J. Foulkes, R. Furbank, S. Griffiths, J. King, E. Murchie, M. Parry, G. Slafer. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell and Environment*, 35: 1799–1823.
167. Reynolds MP., NE. Borlaug. 2006. Impacts of breeding on international collaborative. Wheat improvement. *Journal of Agricultural Science*, 144: 3–17.
168. Richards RA., GJ. Rebetzke, AG. Condon, AF. Van Herwaarden. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci*, 42: 111-121.
169. Romagosa I., PN. Fox. 1993. Genotype x environment interaction and adaptation. p. 374-390. In Hayward, M.D., N.O. Bosemark, and I. Romagosa (eds.) Plant breeding, principles and prospects. Chapman & Hall, London, UK.
170. Rose LW., MK. Das, CM. Taliaferro. 2008. A comparison of dry matter yield stability assessment methods for small numbers of genotypes of Bermudagrass. *Euphytica*, 164 : 19-25.
171. Sabaghnia N., H. Dehghani, SH. Sabaghpour. 2006. Nonparametric methods for interpreting genotype × environment interaction of lentil genotypes. *Crop Sci*, 46: 1100-1106.

172. Samonte SOPB., LT. Wilson, AM. Mcclung, JC. Medley. 2005. Targeting cultivar onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Crop Sci*, 45: 2414-2424.
173. Sanchez-garcia M., C. Royo, N. Aparicio, JA. Martín-Sánchez, F. Álvaro. 2013. Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *Journal of Agricultural Science*, 151 : 105–118.
174. Schoeman LJ. 2003. Genotype x environment interaction in sunflower (*Helianthus annuus*) in South Africa, (M. Sc. Thesis), University of Free State, Bloemfontein.
175. Semenov MA., NG. Halford. 2009. Identifying target traits and molecular mechanisms for wheat breeding under a changing climate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2791–2804.
176. Shukla GK. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity*, 29: 237-245.
177. Silva RR., G. Benin, JA. Marchese, EDB. Silva, VS. Marchioro. 2014. The use of photothermal quotient and frost risk to identify suitable sowing dates for wheat. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 36: 99-110.
178. Simmonds NW. 1976. Evolution of Crop Plants, Longmans, London, 350 pp.
179. Sinebo W. 2005. Trade-off between yield increase and yield stability in three decades of barley breeding in a tropical highland environment. *Field Crops Research*, 92: 35-52.
180. Sinebo W., R. Gretzmacher, A. Edelbauer. 2004. Genotypic variation for nitrogen use efficiency in Ethiopian barley. *Field Crops Res*, 85: 43–60.
181. Slafer GA., JL. Araus, C. Royo, LFG. Del Moral. 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Annals of Applied Biology*, 146: 61–70.
182. Spagnoletti Zeuli PL., CO. Qualset. 1990. Flag Leaf variation and analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breeding*, 105: 189-202.
183. Stapper M., HC. Harris. 1989. Assessing the productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. *Field Crops Research*, 20: 129-152.
184. Stapper M., RA. Fischer. 1990. Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in southern New South Wales. I. Phasic development canopy growth and spike production. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41: 997-1019.

185. Stojaković M., M. Ivanović, Đ. Jocković, G. Bekavac, B. Purar, A. Nastasić, D. Stanisavljević, B. Mitrović, S. Treskić, R. Laišić. 2010. NS maize hybrids in production regions of Serbia. *Field and Vegetable Crops Research*, 47: 93-02.
186. Suleiman AA., JF. Nganya, MA. Ashraf. 2014. Effect of cultivar and sowing date on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Khartoum, Sudan. *Journal of Forest Products and Industries*, 3: 198-203.
187. Talbert PB., HT. Adler, DW. Parks, L. Comai. 1995. The REVOLUTA gene is necessary for limiting cell divisions in the leaves and stems of *Arabidopsis thaliana*. *Development*, 121: 2723–2735.
188. Tapley M., BV. Ortiz, E. Van Santen, KS. Balkcom, P. Mask, DB. Weaver. 2013. Location, Seeding Date, and Variety Interactions on Winter Wheat Yield in the Southeastern United States. *Agronomy*, 105: 509–518.
189. Temesgen T., G. Keneni, T. Sefera, M. Jarsob. 2015. Yield stability and relationships among stability parameters in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. *The crop journal*, 3: 258-268.
190. Vijayakumar CHM., M. Ilyas Ahmed, BC. Viraktamath, R. Balakrishnan, MS. Ramasha. 2001. Genotype x environment interaction effects on yield of rice hybrids in India. *Indian J. Genet*, 61: 101-106.
191. Virk DS., SS. Chahal, HS. Pooni. 1985. Repeatability of stability estimators for downy mildew incidence in pearl millet. *Theoretical and Applied Genetics*, 70: 102-106.
192. Wall AM., R. Ripley, MD. Gale. 1971. The position of a locus on chromosome 5B of *Triticum aestivum* affecting homoeologous meiotic pairing. *Genet Res*, 18: 329-339.
193. Wang GZ., NT. Miyashita, K. Tsunewaki. 1997. Plasmon analyses of *Triticum* (wheat) and *Aegilops*: PCR-single-strand conformational polymorphism (PCR-SSCP) analyses of organellar DNA. *PNAS*, 94: 14570-14577.
194. Wricke G., WE. Weber. 1986. Quantitative Genetics and Selection in Plant Breeding. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 406 pages.
195. Wricke G. 1962. On a method of understanding the biological diversity in field research. *Z. Pfl. Zucht*, 47: 92–146.
196. Yahyaoui A., MS. Hakim, K. Nazari, M. Torabi, CR. Wellings. 2002. Yellow (stripe) rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) in Central and Western Asia. In: Johnson R, Yahyaoui A,



Wellings CR, Saidi A, Ketata H (eds) Meeting the Challenge of Yellow Rust in Cereal Crops. ICARDA Aleppo, Syria.

197. Yan W., LA. Hunt, Q. Sheng, Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci*, 40: 597-605.
198. Yan W. 2001. GGE biplot-a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data. *Agron J*, 94: 1396-1401
199. Yan W. 2002. Singular value partitioning for biplot analysis of multi-environment trial data. *Agron J*, 94: 990-996.
200. Yan W., LA. Hunt. 2002. Biplot analysis of diallel data. *Crop Science*, 42: 21-30.
201. Yan W., MS. Kang. 2003. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL.
202. Yan W., NA. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant Sci*, 86: 623-645.
203. Yan W., LA. Hunt, O. Sheng, Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci*, 40: 597-605.
204. Yan W., LA. Hunt. 2001. Interpretation of genotype  $\times$  environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Sci*, 41: 19-25.
205. Yan W., MS. Kang, BL. Ma, S. Woods, PL. Cornelius. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci*, 47: 643-653.
206. Yau SK., J. Hamblin. 1994. Relative yield as a measure of entry performance in variable environments. *Crop Sci*, 34: 813-817.
207. Zhang Z., C. Lu, ZH. Xiang. 1998. Stability analysis for varieties by AMMI model. *Acta Agron. Sin*, 24 : 304-309.
208. Zhang Y., Z. He, A. Zhang, M. Van Ginkel, RJ. Pena, G. Ye. 2006. Pattern analysis on protein properties of Chinese and Cimmyt spring wheat cultivars sown in China and Cimmyt. *Australian Journal of agricultural Research*, 57: 811-822.

**ملخص:** هدف هذا العمل هو دراسة العوامل التي تفسر تفاعل أنماط وراثية x البيئات للقمح الصلب (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) تحت الظروف الشبه الجافة لسطيف، من خلال استخدام نماذج AMMI و GGE وبعض مؤشرات الاستقرار. تحقيقاً لهاته الغاية، زرع خمسة عشرة صنف من القمح الصلب في ثلاثة مواسم متتالية (2012/13، 14/13 و 15/14) في تاريخي بذر (مبكر ومتأخر)، على مستوى ITGC سطيف. النتائج المنبثقة من هذه الدراسة تشير بأن آثار العام، النمط الوراثي وتاريخ البذر والتفاعلات هي هامة و هذا لمجموع 13 صفة مختبرة. من وجهة نظر مصادر التباين المهمة في محصول الحبوب، الاختلافات بين السنوات، تواريخ البذر، الأنماط الوراثية والتفاعل GXE شرحت على التوالي، 84.3%، 1.6%، 2.4% و 11.6% من مجموع الانحرافات التريبية للعلاجات. شرح الانحدار المشترك 37.2% من 11.6% من مجموع الانحرافات التريبية SCE لـ GXE. بينما شرح نموذج AMMI 92.1% من SCE للتفاعل و يعتبر أكبر بـ 2.5 مرة من الانحدار المشترك. يشير النموذج AMMI أن الأنماط الوراثية Setifis، Bousselam و Massara هم الأكثر فعالية (من ناحية الإنتاج) على عكس Tajdid، MBB و Cyprus2 التي هي أقل فعالية. وتشير نتائج تحليل الارتباط بين قيمة محصول الحبوب على IPCA1 ومعدل الأنماط الوراثية للصفات المورفولوجية أن عدد السنابل، وزنهم و وزن حبة يساهموا إلى حد كبير في التفاعل GXE للإنتاج، من هذا المنطلق يقترح بأنه للحد من IGE للإنتاج، يجب إبقاء تحت السيطرة الاختلاف، بين البيئات، لهذه الصفات، و التي ينبغي أن تكون في أدنى مستوى ممكن. بالنسبة للنموذج GGE، فهو يفسر 73.4% من SCE لآثار GGE للإنتاج، ويحدد 5 بيئات محتملة نموذجية والتي مثل ثلاثة منها من البيئات السنة التي تم اختبارها. يشير هذا النموذج أن Massara هي ذات إنتاج مرتفع ومستقر. وأخيراً، يتم فصل مختلف مؤشرات الاستقرار المحسوبة إلى مجموعتين، وهذا يتوقف على نوع الاستقرار المنشود، ديناميكي أو ثابت. من بين هذه المؤشرات، مؤشر Pi يظهر علاقة وثيقة جداً مع فعالية الإنتاج. ويظهر النمط الوراثي Setifis بأنه الأكثر فعالية واستقرار في حين المؤشر TOP يقترح النمط الوراثي Massara. هذان النمطان الوراثيان حققا ربح في الإنتاج بـ 42% و 35% نسبياً مقارنة بالشاهد MBB.

**الكلمات المفتاحية:** *Triticum durum*، أنماط وراثية، بيئات، تفاعل، AMMI، GGE، مؤشرات، فعالية، استقرار، صفات.

**Résumé:** Le présent travail se fixe pour objectif l'étude des facteurs explicatifs de l'interaction génotypes x milieux du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) sous les conditions semi-arides de Sétif, par l'utilisation des modèles AMMI et GGE ainsi que quelques indices de stabilité. À cet effet, quinze variétés de blé dur ont été semées au cours de trois campagnes agricoles consécutives (2012/13, 13/14 et 14/15) en deux dates de semis (précoce et tardive), au niveau de l'ITGC Sétif. Les résultats qui s'y découlent de cette étude indiquent des effets moyens année, génotype et date de semis et des interactions significatifs pour l'ensemble des 13 caractères analysés. Du point de vue importance des sources de variation du rendement en grains, les différences entre années, dates de semis, génotypes et interaction GxE expliquent, respectivement, 84.3%, 1.6%, 2.4% et 11.6% de la somme des carrés des écarts des traitements. La régression conjointe explique 37.2% des 11.6% de la SCE de l'IGE. Alors que le modèle AMMI explique 92.1% de la SCE de l'interaction soit 2.5 fois plus que la régression conjointe. Le modèle AMMI indique que les génotypes Setifis, Bousselam et Massara sont les plus performants à l'inverse de Tajdid, MBB et Cyprus2 qui sont les moins performants. Les résultats de l'analyse des corrélations entre les scores du rendement en grains sur l'IPCA1 et les moyennes génotypiques des caractères morphologiques indiquent que le nombre d'épis, le poids des épis et le poids de 1000 grains contribuent significativement à l'interaction GxE du rendement, ce qui suggère que, pour réduire de l'IGE du rendement, il faut garder sous contrôle la variation, inter environnements, de ces caractères, qui doit être la plus faible possible. Pour le modèle GGE, il explique 73.4% de la SCE des effets GGE du rendement et identifie 5 environnements potentiels typiques dont trois sont représentés parmi les six environnements testés. Ce modèle indique que Massara est performant et stable. Enfin, les différents indices de stabilité calculés sont séparables en deux groupes, selon le type de stabilité recherchée, dynamique ou statique. Parmi ces indices, l'indice Pi montre une relation très étroite avec la performance de rendement. Il identifie le génotype Setifis comme le plus performant et stable alors que l'indice TOP suggère le génotype Massara. Ces deux génotypes apportent un gain de rendement de 42% et 35% relativement au rendement du témoin MBB.

**Mots clés:** *Triticum durum*, génotypes, Environnements, Interaction, AMMI, GGE, indices, performance, stabilité, caractères.

**Abstract:** This work's objective is the study of the factors explaining the interaction genotypes x environments of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under semi-arid conditions of Sétif, through the use of AMMI and GGE models as well as some stability indices. For this purpose, fifteen varieties of durum wheat were sown in three consecutive crop years (2012/13, 13/14 and 14/15) in two planting dates (early and late), at the ITGC of Sétif. The results that it follow from this study indicate means year, genotype and sowing date and interactions effects are significant for all 13 characters analyzed. From the point of view important sources of variation in grain yield, the differences between years, planting dates, genotypes and GxE interaction explain, respectively, 84.3%, 1.6%, 2.4% and 11.6% of the sum of squared deviations of treatments. The joint regression explained 37.2% of the SSD of IGE, while the AMMI model explained 92.1% of the SSD interaction is 2.5 times more important than the joint regression. The AMMI model indicates that Setifis Bousselam and Massara genotypes are the most efficient unlike Tajdid, MBB and Cyprus2 that are underperforming. The results of correlation analysis between the scores of grain yield on IPCA1 and average genotypic morphological characters show that the number of spikes, weight of spikes and weight of 1000 grains contribute significantly to the interaction GxE performance, suggesting that to reduce the IGE performance, must keep under control the variation, inter environments, of these characters, which should be as low as possible. For GGE model, it explains 73.4% of the SSD of GGE performance effects and identifies 5 potential typical environments which three are represented among the six tested environments. This model indicates that Massara is efficient and stable. Finally, the different calculated stability indexes are separated into two groups, depending on the desired, dynamic or static stability. Among these indices, the index Pi shows a very close relationship with the yield performance. It identifies the Setifis genotype as the most efficient and stable while the index TOP suggests Massara genotype. These two genotypes bring a performance gain of 42% and 35% relative performance of MBB witness.

**Key words:** *Triticum durum*, Genotypes, environments, Interaction, AMMI, GGE, Indices, Performance, Stability, Characters.