

***Etude de la tolérance aux stress abiotiques
chez le blé dur (*Triticum durum* Desf) sous
étage du semi-aride***

Présenté par Mr. ADJABI Abdelhamid

Rapporteur : Pr. BOUZERZOUR HUNIV. F. ABBAS, Sétif
Année universitaire 2010/2011

Devant le Jury Composé de : **Président : Pr. AIDAOUI A. E.N.S.A, EL-Harrach, Alger**
Examineurs : Pr. Mme. MEKLICHE A. E.N.S.A, EL- Harrach, Alger Dr . BENBELKACEM INRA/URC.
Constantine.

Table des matières

Dédicace . . .	5
REMERCIEMENTS . . .	6
RESUME . . .	7
ABSTRACT . . .	8
ص غ ل م . . .	9
LISTE DES ABREVIATIONS . . .	10
INTRODUCTION GENERALE . . .	12
Chapitre -I- Revue bibliographique . . .	14
I.1. La culture du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.). . .	14
I.1. 1. Dans le monde . . .	14
I.1. 2. En Algérie . . .	16
I.2- Contraintes climatiques de la production du blé dur . . .	18
I.2.1. Les basses températures . . .	18
I.2.2. Le déficit hydrique et les hautes températures . . .	19
I.3. Adaptation à la variabilité climatique du milieu . . .	20
I.3.1. Mécanismes de tolérance du stress . . .	21
I.3.2. Architecture de la plante tolérante au stress . . .	21
I.4-La sélection pour la tolérance du stress : adaptation au milieu . . .	23
I.4.1. Comment estimer la tolérance du stress ? . . .	23
I.4.2. La stabilité . . .	23
I.4.3. L'interaction Génotype x environnement . . .	23
Chapitre II : Etude de la variabilité interannuelle des rendements du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) sous conditions semi-arides . . .	27
Résumé. . .	27
Abstract. . .	27
Introduction . . .	28
II.1. Matériels et méthodes . . .	29
II.1.1. Site expérimental . . .	29
II.1.2. Expérimentation . . .	29
II.2. Résultats et discussion . . .	31
II.2.1. Variation du rendement en grain intra et inter années . . .	31
CONCLUSION . . .	49
Chapitre III. : Etude de la tolérance du blé dur (<i>T. durum</i> Desf.) aux stress abiotiques sous conditions semi-arides : Utilisation des indices de la tolérance à la contrainte . . .	50
Résumé. . .	50
Abstract. . .	50
Introduction . . .	51
III.1. Matériel et méthodes . . .	52
III.1.1. Matériel végétal et indices utilisés . . .	52
III.1.2. analyse des données . . .	52
III.2. Résultats et discussion . . .	53

III.2.1. L'indice S . . .	53
III.2.2. Les indices MP, GMP et STI . . .	54
III.2.3. LES INDICES YSI et TOL . . .	55
III.2.4. Les indices YI, RY et HMP . . .	55
III.2.5. Ressemblance des indices de tolérance . . .	56
III.2.6. Typologie variétale . . .	57
Conclusion . . .	61
Chapitre IV :Etude de la tolérance du blé dur (<i>T. durum</i>Desf.) aux stress abiotiques sous conditions semi-arides : Stabilité du rendement et discrimination isotopique du carbone . . .	63
Résumé. . .	63
Abstract. . .	63
Introduction . . .	64
IV.1.Materiel et méthodes . . .	65
IV.1.1. Conduite des essais, notations et discrimination isotopique du carbone . . .	65
IV.1.2. Analyse des données . . .	66
IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION . . .	68
IV.2.1. Variation du rendement et de la discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) . . .	68
IV.2.2.Relation entre le rendement grain, $\Delta^{13}\text{C}$ et les variables mesurées par année . . .	72
Conclusion . . .	74
CONCLUSION GENERALE . . .	76
Références . . .	78
Annexe . . .	88

Dédicace

Cette thèse est un hommage à mon cher et regretté père, mort à la Mecque. Mr ADJABI Lakhdar Il était un pilier solide et incontournable pour moi et surtout durant mon parcours scolaire depuis l'école primaire jusqu'à l'Université. Qu'il se repose en paix du Dieu, Amen !!! A ma chère et regrettée Mère. A ma chère et regrettée belle-sœur. Qu'elles se reposent aussi en paix du Dieu, Amen !!! A tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation. Ma profonde reconnaissance à ma chère épouse pour son soutien sans faille, sa compréhension et surtout sa contribution dans le partage du stress de la recherche et de la vie quotidienne. A ma chère fille Aroua

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Mr. Le Professeur **BOUZERZOUR, Hamena**, Professeur au département de Biologie, Faculté de la nature et de la vie, Université de Sétif, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'accueillant parmi son équipe de travail de recherche sur les céréales, pour avoir dirigé et orienté ce travail dont il est à l'origine et pour ses conseils, son aide, sa disponibilité et son encouragement qui ont été très précieux pour terminer ce travail, qu'il trouve ici l'attestation de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier aussi Mr. Le Professeur **AIDAOUI A.** pour avoir l'honneur de présider le jury de cette thèse.

M^r. **BENBELKACEM K.** et M^{me} **MEKLICHE A.**

ont bien voulu juger ce travail, je leur exprime tous mes respects.

Je suis aussi très reconnaissant à M^r **PRIOUL J.L.**, Directeur de l'Institut de Biotechnologie des plantes, UMR 8 618, Université Paris Sud, France, pour m'avoir délivré une lettre d'acceptation et de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire de recherche pour les analyses du carbone 13, pour un stage d'un mois pour deux années successives.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Mr. Le Professeur **Philippe MONNEVEUX**, Professeur à l'ANSA-INRA de Montpellier, pour ses précieux conseils au sujet du stress hydrique des céréales.

Je tiens à remercier aussi mon ami **HAFSI Miloud** pour m'avoir orienté vers cette spécialité qui est la céréaliculture, pour ses conseils, aide et encouragement.

Que tout le personnel de la station de recherche agricole de l'I.T.G.C de Sétif et en particulier M^r le Directeur **DJEGHABA, F., BENMOHAMMED, A., MAKHLOUF, M., ZERRAGUI, H., HASSOUS, L., AYADI, A.L. , HARKATI, B. et REFFOUFI, B.**, trouve ici l'expression de ma sympathie.

Je remercie également tout le personnel de l'INRA, en particulier mon ami **MAKHLOUF, A.**, le Directeur **ACHIRI, A. et HANNACHI, A.**

Et enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont rendu possible ce travail. Que tout un chacun trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

RESUME

Les résultats de l'étude de l'interaction génotype x année des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) testées au cours de six campagnes agricoles consécutives (1998-2003), sous conditions semi-arides indiquent peu de reproductibilité de l'information concernant le rendement grain suite au changement de l'ordre de classement des génotypes d'une année à l'autre. Au cours des six campagnes, hormis Béliouni, MBB et Sémito qui figuraient parmi les moins performants, les autres génotypes tenaient la tête du classement au moins une fois. La présence de l'interaction est suggérée par le ratio $\#^2_{\text{maxi}}/\#^2_{\text{mini}}$ qui varie de 1 à 12.1 et par l'analyse de la variance combinée qui indique que la somme des carrés des écarts (SCE) des traitements est constituée de 42.41%, 8.43% et 49.15%, respectivement pour l'effet année, génotype et interaction. La régression conjointe est peu apte à traiter les données d'une telle expérimentation dont elle n'explique que 12.76% de la SCE de l'interaction. Par contre le modèle AMMI s'avère plus adapté, expliquant jusqu'à 84.0% de la SCE de l'interaction. L'AMMI₁ décrit bien la complexité de l'interaction associée aux comportements des 15 génotypes évalués. Cependant d'un point de vue sélection, il s'avère difficile d'identifier un génotype adapté à toutes les campagnes et possédant, en plus, un rendement élevé. Le génotype relativement le plus stable est Mrb16/Ente//Mario, qui se distingue par un rendement moyen supérieur à la moyenne générale des 6 campagnes. Le génotype le plus performant, en moyenne des 6 campagnes, mais dont le comportement est très irrégulier, est Cyprus1. Ceci suggère que la stabilité n'est pas associée à la performance. La classification hiérarchique des campagnes et des génotypes suggère l'existence de facteurs limitants très différents qui se sont exprimés lors des différents groupes de campagnes pour les différents groupes de génotypes. Les indices de tolérance utilisés classent différemment les génotypes évalués et forment des groupes divergents. Les résultats suggèrent d'utiliser l'un des indices P, MP, GMP ou STI, lorsque la sélection est orientée vers la performance et la tolérance des stress. Dans le cas où l'on privilégie la sélection des génotypes tolérants et plus performants sous conditions de stress, il est conseillé d'utiliser l'indice HMP. L'utilisation de ces indices a identifié les génotypes Cyprus1 et Heider/Martes//Huevos de Oro comme les plus tolérants et performants sur l'ensemble des milieux. Elle a identifié aussi Waha et Adamillo/ Duilio//Simeto comme tolérants et performants uniquement dans les milieux favorables et les génotypes Massara1 et Belikh2 comme tolérants et performants dans les milieux non favorables. L'étude de la relation entre le rendement grain, la stabilité temporelle et la discrimination isotopique du carbone indique que le rendement grain mesuré au cours des six campagnes ne montre pas de liaisons significatives avec $\#^{13}\text{C}$, mesuré au cours d'une seule saison. Le signe négatif des coefficients de corrélation suggère que les génotypes ayant un faible $\#^{13}\text{C}$ sont plus aptes à maintenir la croissance sous conditions de stress que les génotypes présentant un $\#^{13}\text{C}$ élevé. La sélection pour de faibles valeurs de $\#^{13}\text{C}$ est attractive mais demande à être confirmée par d'autres études complémentaires sous les mêmes conditions.

Mots clés. *T. durum* - Interaction – AMMI – Régression – Classification – Adaptation – Indice – Performance - Stabilité temporelle - Discrimination isotopique du carbone - Climat méditerranéen.

ABSTRACT

Title. Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) tolerance to abiotic stresses under Mediterranean climate

Abstract. *The results of the study of the genotype x years interaction of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties tested during six consecutive cropping seasons (1998-2003), under semi-arid conditions, indicated the lack of reproducibility of the yield information because genotype rank changes from one year to another. During the six cropping seasons, except Béliouni, MBB and Simeto which performed always poorly the remaining genotypes ranked among the top yielding at least once. The presence of genotype x years is suggested by the ratio $\#^2 \text{max} / \#^2 \text{mini}$ which ranged from 1 to 12.1 and by the combined analysis of variance which indicated that the treatment SS consisted of 42.41%, 8.43% and 49.15% due, respectively to the year, genotype and interaction effects. The joint regression explained only 12.76% of the interaction SS and was less efficient in analyzing the data of this experiment. The AMMI model was more appropriate, explaining 84.0% of the interaction SS. The AMMI1 biplot described fairly well the complexity of the interaction that is associated with the behavior of the 15 evaluated genotypes. From the selection point of view, it is difficult to identify a genotype adapted to all cropping seasons and showing high yield. Over the six cropping seasons, the most stable genotype was Mrb 16 /Ente // Mario which exhibited a mean yield higher than the overall average of 6 cropping seasons and 15 genotypes. The best yielding genotype, on average, was Cyprus 1 which exhibited however an irregular yielding pattern. This suggests that stability is not linked to yield performance. Cropping seasons and genotypes clustering suggested the existence of limiting factors that have very different effects within the various groups of genotypes and cropping seasons. Stress tolerance indices classify the evaluated genotypes into divergent groups. The results suggest using one of the following indices P, MP, GMP, or ITS, when selection is targeted towards performance and stress tolerance. When selection is directed toward genotypes tolerant to stresses and high yielding under stressful conditions, it is advisable to use the HMP index. The use of these indices identified Cyprus1 and Heider/Martes// Huevos de Oro as the most tolerant and high yielding in all environments. Waha and Adamillo/ Duilio//Simeto were indentified as stress tolerant and high yielding under favorable environments, Massara1 and Belikh2 were classified as stress tolerant and high yielding under less favorable environments. The results of study of the relationship between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination indicated that grain yields measured during six cropping seasons were not significantly correlated with $\#^{13}\text{C}$ measured during one season-test. The negative sign of the correlation coefficients indicated that genotypes having low $\#^{13}\text{C}$ have more room to sustain growth than high $\#^{13}\text{C}$ genotypes under the stress full conditions. Selection efficiency for low $\#^{13}\text{C}$ seems appealing but still needs to be confirmed under such environment.*

Keyword *s. *Triticum durum* – Interaction – AMMI – Regression – Classification – Adaptation -Index - Tolerance –Performance - Temporal stability - Carbon isotope discrimination - Mediterranean climate.*

ص خلم

Triticum durum السنوي لأصناف القمح الصلب **x**: تشير النتائج لدراسة التفاعل النمط الوراثي في المناطق القبية حافة ، إلى قلة المعلومات (2003-1998) أثناء المواسم الزراعية الست المتتالية. Desf. نتيجة تغير الترتيب للأصناف من سنة إلى أخرى. أثناء المواسم الست، باستثناء الخاصة بالعدة الحبية للأصناف المدان يعتبر أقل قدرة إنتاجية فإن الأصناف الأخرى Simeto أو MBB و الصنفان Beliouني صنف δ التي تتراوح من $1 - \delta_{\max}^2$ تحت الرتبة الأولى على الأقل مرة واحدة. إن وجود التفاعل مابين بالنسبة للمعاجات المكونة من (SCE) إلى 12.1 و التباين الوراثي المنتسب الذي يشير بأن مجموع المربعات الفروق الانحدار المسبق على التوالي يتأثر السنة والصنف و التفاعل. فإن % 49.15 ، 8.43 و 42.41 % قليل القدرة على معالجة المعلومات هذه التجربة و التي لا تفسر إلا 12.76 Régression conjointe SCE من % يظهر أنه أكثر تأقلا و بالتالي يتنسر حتى AMMI84.0 للتفاعل و بينما النموذج SCE من يصف جيدا إشكالية التعقد للتفاعل المرتبط بسلوك الأصناف الخمسة عشر AMMI للتفاعل. فالنموذج الهجرة ولكن من الناحية الانتخاب فإنه يبدو صعب التعرف عن نمط وراثي الذي يتألفه مع كمال المواسم و الذي Enté Mario Mrb₁₆ يحتوي على مردود مرتفع زيادة على ذلك. الصنف الأكثر استقرار نسبي هو يتميز بمردود متوسط أكثر من المعدل العام للمواسم الست. الصنف الأكثر قدرة إنتاجية بالنسبة للمواسم هذا ما يرجي بأن الاستقرار غير مرتبط بالقدرة Cyprus لست و لكن ذا سلوك غير منظم جيدا فهو إنتاجية. يوصي الترتيب التسلسلي للمواسم و الأصناف بوجود عوامل مفيدة ومتغيرة جيدا التي لم تغير أثناء مجموعات المختلفة للمواسم. مؤشرات التحمل المستعملة ترتب الأصناف المدروسة و تكون مجموعات مختلفة. إذا كان الانتخاب موجه إلى القدرة STI GMP, MP, P توحي النتائج باستعمال أحد المؤشرات التالية إنتاجية و التحمل للإجهاد. في حالة انتخاب أصناف متحملة للإجهاد و أكثر قدرة إنتاجية تحت الظروف استعمال هذه المؤشرات قد عرفنا على أصناف HMP. الإجهاد، فإنه يستحسن استعمال المؤشر كأصناف أكثر تحملا و أكثر قدرة إنتاجية في كل Cyprus, Heider Martes Hueres de Oro كأصناف متحملة و ذات قدرة Waha, Adimillo Duillo//Sémito لأوساط. عرفنا أيضا على أن كأصناف متحملة و ذات قدرة إنتاجية في Belikh₂ و Massami₁ إنتاجية إلا في الأوساط الملائمة و الأوساط الغير ملائمة. تشير دراسة العلاقة بين العلة الحبية و الاستقرار الزمني و التميز لكربون بأن العلة الحبية القدرة أثناء المواسم الزراعية الست لا (Discrimination isotopique) النظائري مقاسة أثناء موسم واحد. توحي العلامة لسالية للمعامل الارتباط بأن $\Delta^{13}C$ تظهر علاقات معنوية مع ضسحية هي التي تكون أكثر تأقلا لقساء النمو تحت ظروف الإجهاد من الأصناف $\Delta^{13}C$ لأصناف ذات أكثر حادية ولكن يحتاج إلى تأكيد ذلك $\Delta^{13}C$ مرتفعة. يكون الانتخاب لقيمة الضعيفة لـ $\Delta^{13}C$ ذات بدراسات أخرى مكتملة تحت نفس لظروف.

الكلمات المتقاطعة: *Triticum durum* Desf. -ساعات نصف حاف- تفاعل x من -AMMI- الأحدث
السف - ترتيب -تألفم - مؤشرات- قدرة إنتاجية- إستقرار زمن - $\Delta^{13}C$ -ساعات متوسطي

LISTE DES ABREVIATIONS

- ADS Adamillo/Duillo//Simeto.
- AMMI Additive Main effects and Multiplicative Interactions.
- an année.
- Anova **A**nalysis of **v**ariance.
- b Coefficient de regression.
- Beli Belioni.
- Bic. Bicro.
- Bkh Belikh.
- C : Cluster.
- Camp Campagne.
- CIMMYT Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- Cyp Cyprus.
- °C Degré Celsius.
- Ddl Degré de liberté.
- Der Deraa.
- k Daki.
- FAO Food, Agriculture and Organisation.
- G x E Génotype x Environnement .
- ha hectare.
- hab habitant.
- Hei Heider.
- MO Heider/Martes//Huevos.
- ICARDA International Center for Agricultural Research in the Dry areas
- IS Indice de Sensibilité.
- ISG Indice Supérieur Géométrique.
- ITGC Institut Technique des Grandes Cultures.
- IPCA Interactive Principal Component Analysis".
- Kg Kilogramme (s).
- MADR Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- Mas Massarin
- MBB Mohammed Ben Bachir.
- MCE Moyenne des Carrés des Ecartés.
- MEP Moyenne Géométrique de Performance.
- MM Moyenne des rendements de l'ensemble des milieux.
- MP Moyenne des Performances.
- Mrb Oum rabiaa.
- ns non significative

- pH potentiel d'Hydrogène.
- q. quintal (aux).
- r Coefficient de corrélation.
- R Coefficient de détermination.
- RDT Rendement.
- Rht₁ Reduced height one.
- Rht₂ Reduced height two
- RY Relative Yield
- S²_d Carré moyen des écarts résiduels de la régression.
- SCE Somme des Carrés des Ecart.
- Sem Simeto.
- STI Stress Tolerance Index
- t tonne.
- t.ha⁻¹ tonne par hectare
- TOL Tolérance.
- WANADIN West Asia and North Africa Nursery
- UE Union Européenne.
- USDA United States Department of Agriculture.
- \$ Unites States (Dollar).
- US Unites States.
- YF Yield Favorable
- YI Yield Index.
- YSI Yield Stress Index.

INTRODUCTION GENERALE

La culture des céréales est une spéculation prédominante de l'agriculture algérienne. Elle occupe près de trois millions d'hectares dans un système biennal dominant jachère-céréale. La production a connu des augmentations sensibles, passant de près de 18 millions de quintaux au début des années 1960 à plus de 33 millions de quintaux à la veille des années 2000 (Hervieu *et al.*, 2006). En dépit de cette croissance allant presque du simple au double, les besoins ne cessent d'augmenter, faisant en sorte que les importations massives sont toujours à l'ordre du jour.

Cette faible performance de la céréaliculture algérienne a plusieurs origines dont le manque d'eau constitue le principal facteur limitant (Chennafi *et al.*, 2006). Compte tenu de cette contrainte climatique, s'ajoutent d'autres difficultés d'ordre technique qui relèvent de l'application d'itinéraires techniques souvent peu ambitieux, donc moins risqués, et de l'utilisation de variétés peu performantes mais rustiques.

Dans le cas du blé dur, jusqu'à présent, la sélection est faite à partir des introductions des Centres Internationaux de la Recherche en Agronomie. Ainsi les variétés sélectionnées réussissent bien en général dans les plaines intérieures et le littoral, mais leurs performances restent très variables et limitées sur les hautes plaines où est localisé l'essentiel des surfaces destinées à cette culture (Fellah *et al.*, 2002 ; Safi, 2010).

On note que le progrès génétique réalisé n'a pas été totalement valorisé, suite au faible taux d'adoption des nouvelles obtentions, notamment sur les hauts plateaux dont le climat est des plus variables (Nouar *et al.*, 2010). Les nouvelles variétés, adoptées par la production, sont généralement sélectionnées sur la base du rendement grain sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs du rendement en milieux variables (Richards *et al.*, 2007 ; Brancourt-Hulmel *et al.* 2005 ; Reynolds *et al.*, 2005 ; Witcombe etVirk, 2009).

La présence de l'interaction génotype x environnement, dans les milieux connus pour leur variabilité climatique, tels que les hautes plaines, réduit sensiblement de l'efficacité du rendement grain comme critère de sélection (Sinebo, 2005).

Dans de tels milieux, selon Ceccarelli *et al.*, (1998), le processus de sélection doit différer de celui appliqué dans les milieux plus favorables et plus réguliers d'un point de vue production. Il est nécessaire de tenir compte de la tolérance des stress prévalant dans la région ciblée(Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005).

Selon Slafer *et al.*, (2005), la caractérisation des mécanismes qui contrôlent la tolérance des stress abiotiques doit être la première étape dans le processus de sélection dans les milieux au climat moins régulier. Il existe en la matière plusieurs mécanismes connus et classés en stratégies d'évitement, d'esquive et de tolérance des contraintes climatiques (Levitt, 1982).

Selon Araus *et al.*, (2003), il existe divers processus phéno-morpho-physiologiques qui sont à l'origine de ces stratégies. Pour chaque environnement, il est nécessaire de déterminer la stratégie de sélection la plus favorable qui réduit de la variation de la production, en minimisant l'effet de l'interaction, tout en améliorant le potentiel productif de la plante sous stress (Witcombe *et al.*, 2009).

Les caractères qui interviennent dans la tolérance sont nombreux et variables en fonction des milieux (Slafer *et al.*, 2005). La sélection de la précocité, adapte le génotype au milieu où il est appelé dans le futur à être cultivé. Le rythme de développement positionne le cycle de la plante pour l'assortir à la période la plus favorable à l'expression du potentiel de production et permet d'éviter les stress au pic de leur avènement (Rebetzke *et al.*, 2007).

Ainsi la biomasse aérienne produite et sa répartition entre les différents puits sont des caractéristiques qui renforcent l'adaptation au milieu et la tolérance des stress (Rebetzke *et al.*, 2002). Les variétés qui réussissent à établir un meilleur équilibre entre les différents puits, dans la répartition des glucides, paraissent plus avantagées en milieux variables que celles qui investissent plus dans un puits par rapport à un autre (Siddique *et al.*, 1989 ; Ehdaie *et al.*, 2006 ; Belkherchouche *et al.*, 2009).

La hauteur des plantes, grâce à ses effets bénéfiques lors des années sèches, effets attribués aux réserves stockées dans le col de l'épi, est une des caractéristiques qui renforce l'adaptation aux milieux variables et la tolérance des contraintes (Ehdaie *et al.*, 2006). La tolérance des stress abiotiques telle que mesurée par la résistance membranaire, ou par la réduction de la température de la canopée et les phénomènes associés, sont autant de paramètres dont le rôle est à étudier dans le comportement variétal (Balota *et al.*, 2007).

L'objectif de l'amélioration de la production des zones arides et semi-arides doit être focalisé sur la recherche de la tolérance aux stress afin d'arriver à une meilleure adaptation à la variabilité, de nature imprévisible, du milieu de production. Il faut pour cela, au cours de la caractérisation du milieu, identifier les stress les plus fréquents, pour leur trouver une stratégie d'évitement ou une source génétique de tolérance (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999).

Le présent travail se propose (1) d'étudier l'interaction génotype x années du rendement grain (2) d'analyser les effets de la sélection sur la base des indices de la tolérance, et (3) d'étudier les relations entre le rendement, la stabilité temporelle et la discrimination isotopique du carbone des génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) évalués sous conditions semi-arides.

Chapitre -I- Revue bibliographique

I.1. La culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.).

I.1. 1. Dans le monde

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est cultivé dans diverses régions du monde, occupant une superficie de 14.4 millions d'hectares, avec une présence plus importante dans le nord de l'Amérique (Dakota, Canada), la Russie et le pourtour du bassin méditerranéen, où il est pratiquement conduit sous régime pluvial. Près de 50 % des superficies mondiales emblavées, soit 7.6 millions d'hectares, sont mises en place dans les pays méditerranéens qui sont le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Syrie, la Turquie, la Grèce, l'Italie et la France (Tableau I.1).

Tableau I.1. Superficies mondiales emblavées en blé dur (x1000 hectares) de 1994-2005

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Algérie	683	1175	1585	590	1600	889	544	1112	1351	1318	1369	1000
Argentine	42	55	83	81	73	70	68	47	39	47	57	54
Australie	40	55	80	100	175	175	175	175	116	200	200	200
Autriche	10	10	11	12	17	20	16	12	13	15	15	15
Canada	2266	2125	2064	2212	2914	1769	2614	2036	2246	2459	2141	2200
France	235	229	270	264	296	327	338	306	335	353	406	415
Allemagne	11	8	8	7	7	12	9	5	5	4	8	8
Grèce	480	450	450	470	550	425	450	450	400	400	500	500
Inde	750	770	750	750	450	450	450	450	500	350	450	450
Italie	1527	1623	1628	1665	1607	1691	1663	1664	1733	1690	1870	1450
Kazakh	1,00	900	800	700	500	300	100	50	100	50	100	100
Mexique	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	240
Maroc	1336	800	1250	972	1127	1078	1079	977	882	1093	1111	1050
Portugal	21	26	26	27	27	73	139	134	185	150	145	120
Russie	2000	2000	1800	1600	1400	1200	1000	1000	2100	1000	1000	1000
Espagne	610	450	648	644	625	500	868	883	925	907	910	850
Syrie	1100	1100	1200	1,30	1,30	800	900	883	832	880	830	830
Tunisie	400	560	900	600	600	670	600	630	600	700	830	750
Turquie	750	800	900	1100	1100	1100	1100	900	1100	1100	1100	1100
GBretagne	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
USA	1099	1358	1439	1286	1509	1444	1446	1129	1096	1161	956	993
EU	2896	2798	3042	3090	3130	3049	3484	3455	3597	3520	3855	3359
Total	14592	14726	16123	14611	16108	13224	13790	13074	14789	14108	14229	13326

Les superficies mondiales de blé dur ont tendance à régresser, alors que la production progresse significativement, oscillant entre 26 et 33 millions de tonnes au cours de la période 1994-2005 (Tableau I.2). Les productions de 2006, 2007, 2008 et 2009 ont été,

respectivement de 35.8, 35, 38.5 et 38 millions de tonnes (USDA-Canada Grains Council, 2009).

Les changements les plus significatifs ont eu lieu dans les pays du bassin méditerranéen : la France, l'Espagne et l'Italie ainsi qu'en Syrie et en Turquie (Tableau I.2).

L'Algérie reste le pays où le rendement en grain est le plus faible, soit 1.01 t ha^{-1} , alors qu'en Grèce, en Italie et en Syrie, il avoisine les 2.5 t/ha et 1.9 t/ha au niveau mondial (Tableau I.3).

Tableau I.2. Production mondiale de blé dur ($\times 10^3 \text{ t}$) de 1994 à 2005 (<http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/07/durum2005/durum%20tables.htm>)

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Algerie	560	1,190	2,035	460	1,500	900	486	1,222	951	1,809	1,816	1,000
Argentine	100	97	193	287	158	176	187	135	98	147	180	160
Australia	55	200	260	280	400	400	400	400	100	450	400	400
Autriche	38	38	42	50	66	98	43	46	49	60	60	60
Canada	4,635	4,648	4,627	4,352	6,042	4,341	5,709	2,987	3,877	4,280	4,962	4,750
France	1,044	1,037	1,255	851	1,545	1,541	1,676	1,338	1,614	1,428	2,050	1,650
Allemagne	58	37	47	34	60	65	43	24	26	20	50	46
Grèce	1,100	920	650	1,000	1,230	850	900	810	1,005	700	1,000	1,000
Inde	1,700	1,900	1,800	1,800	1,000	1,000	1,000	1,200	1,400	800	1,200	1,200
Italie	3,900	3,800	4,000	3,600	4,500	4,100	4,310	3,500	4,400	3,730	5,700	3,500
Kazakh	700	500	500	500	300	400	100	50	100	100	100	100
Mexique	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,200	1,200	1,200
Maroc	2,342	500	2,270	882	1,544	800	427	1,039	1,032	1,766	2,025	750
Portugal	43	26	41	44	28	90	173	103	348	155	165	70
Russie	1,800	1,000	1,300	2,000	500	1,000	1,000	1,300	1,500	1,200	1,000	1,200
Espagne	963	300	1,550	1,114	1,290	450	1,917	1,756	2,073	2,249	2,825	1,000
Syrie	1,950	2,350	2,450	1,900	2,600	1,000	1,100	2,400	2,300	2,300	2,100	2,100
Tunisie	440	470	1,620	800	1,100	1,140	1,100	935	370	1,300	1,400	1,150
Turquie	1,075	1,300	1,500	2,200	2,400	1,600	2,000	1,600	2,300	2,300	2,400	2,300
GBretagne	10	10	5	5	5	5	5	6	6	5	6	6
USA	2,630	2,780	3,160	2,390	3,760	2,700	2,990	2,270	2,180	2,630	2,450	2,560
EU	7,156	6,168	7,590	6,698	8,724	7,199	9,067	7,5832	9,521	8,347	11,856	7,332
Total	26,243	24,203	30,405	25,649	31,128	23,756	26,666	24,221	26,829	28,629	33,089	26,202

Le commerce du blé dur est dominé par l'offre venant du Canada , des USA et de l'Union Européenne. Près de 95 % du volume échangé est produit par ces pays. Le Canada et les USA participent à hauteur de 50 % dans ces échanges (FAO, 2007). Les pays de l'Afrique du nord absorbent la totalité des quantités mises sur le marché. L'Algérie achète à elle seule près de 50% de ces quantités.

Tableau I.3. Moyennes (tha^{-1}) de rendement en grain du blé dur de 1994 à 2005

Etude de la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf) sous étage du semi-aride

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Algerie	0.82	1.01	1.28	0.78	0.94	1.01	0.89	1.1	0.7	1.37	1.33	1
Argentine	2.38	1.76	2.33	3.54	2.16	2.51	2.75	2.87	2.51	3.13	3.16	2.96
Australia	1.38	3.64	3.25	2.8	2.29	2.29	2.29	2.29	0.86	2.25	2	2
Autriche	3.8	3.8	3.82	4.17	3.88	4.9	2.69	3.83	3.77	4	4	4
Canada	2.05	2.19	2.24	1.97	2.07	2.45	2.18	1.47	1.73	1.74	2.32	2.16
France	4.44	4.53	4.65	3.22	5.22	4.71	4.96	4.37	4.82	4.05	5.05	3.98
Allemagne	5.27	4.63	5.88	4.86	8.57	5.42	4.78	4.8	5.2	5	6.25	5.75
Grèce	2.29	2.04	1.44	2.13	2.24	2	2	1.8	2.51	1.75	2	2
Inde	2.27	2.47	2.4	2.4	2.22	2.22	2.22	2.67	2.8	2.29	2.67	2.67
Italie	2.55	2.34	2.46	2.16	2.8	2.42	2.59	2.1	2.54	2.21	3.05	2.41
Kazakh	0.7	0.56	0.63	0.71	0.6	1.33	1	1	1	2	1	1
Mexique	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	5.22	5.22	5
Maroc	1.75	0.63	1.82	0.91	1.37	0.74	0.4	1.06	1.17	1.62	1.82	0.71
Portugal	2.05	1	1.58	1.63	1.04	1.23	1.24	0.77	1.88	1.03	1.14	0.58
Russie	0.9	0.5	0.72	1.25	0.36	0.83	1	1.3	0.71	1.2	1	1.2
Espagne	1.58	0.67	2.39	1.73	2.06	0.9	2.21	1.99	2.24	2.48	3.1	1.18
Syrie	1.77	2.14	2.04	1.46	2	1.25	1.22	2.72	2.76	2.61	2.53	2.53
Tunisie	1.1	0.84	1.8	1.33	1.83	1.7	1.83	1.48	0.62	1.86	1.69	1.53
Turquie	1.43	1.63	1.67	2	2.18	1.45	1.82	1.78	2.09	2.09	2.18	2.09
GBretagne	5	5	5	5	5	5	5	6	6	5	6	6
USA	2.39	2.05	2.2	1.86	2.49	1.87	2.07	2.01	1.99	2.27	2.56	2.58
EU	2.47	2.2	2.5	2.17	2.79	2.36	2.6	2.19	2.65	2.37	3.08	2.18
Total	1.8	1.64	1.89	1.76	1.93	1.8	1.93	1.85	1.81	2.03	2.33	1.97

(<http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/07/durum2005/durum%20tables.htm>

)

I.1. 2. En Algérie

En Algérie, la culture du blé dur occupe, chaque année près de 1,1 millions d'hectares dans un système où domine la rotation jachère céréale (Féliachi, 2002). Les besoins nationaux, toutes céréales confondues, ont évolués de 19,5 millions de quintaux en 1961 à 95.0 millions de quintaux au début des années 2000 (Hervieu *et al.*, 2006). Avec l'augmentation de la population, on note une forte pression de la demande qui est satisfaite par les importations massives. Au niveau du marché international, les prix ont chutés, passant de 900 Dollars (\$) US/la tonne (t), en 2008, à 210 \$US/t en 2009. Les prix payés, aux producteurs américains, varient entre 140 et 150 \$US/t (USDA-Canada Grains Council, 2009), alors que celui payé au producteur algérien est de 4500 DA/q.

Actuellement, le pays se classe au 1^{ier} rang mondial pour la consommation des céréales avec une moyenne dépassant largement les 200 kg/hab/an (Tableau I.4), comparativement à l'Egypte dont la moyenne est de 131 kg/hab/an et à la France dont la moyenne est de 98 kg/hab/an (FAO, 2007). La croissance démographique, le changement du modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, ont fait que le volume des céréales consommées a augmenté de 427 %, entre 1961 et 2003, passant de 1,2 millions de tonnes (Mt) à 6,4 Mt (FAO, 2005). Ceci place l'Algérie en première position après l'Egypte et la Tunisie, pays qui connaissent une forte pression à la demande alimentaire, notamment en céréales (Fig.1 ; Hervieu *et al.*, 2006).

Tableau I.4. Consommation moyenne (kg/hab/an) algérienne de céréales, entre 1961-2005 (FAO, 2007).

Périodes		1961	1970	1980	1990	2000	2003	2005
Consommation	110	120	182	193	190	201	215	

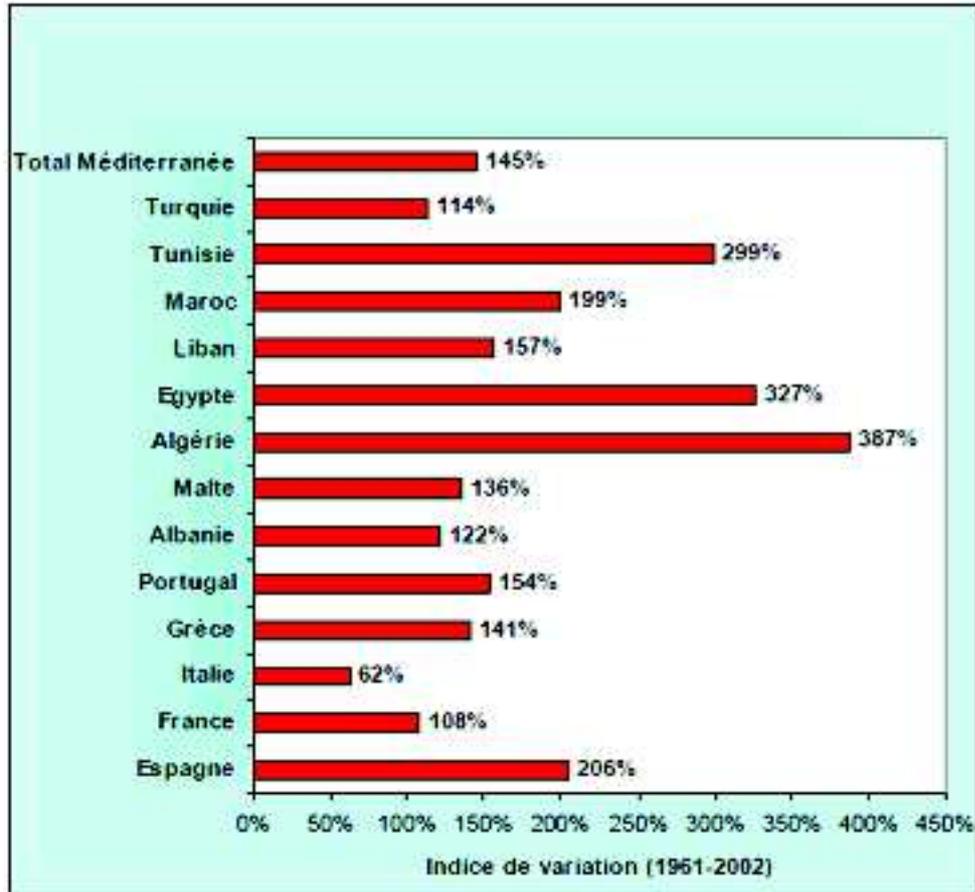


Figure I.1. Evolution de la demande en céréales des pays du bassin méditerranéen

La culture du blé dur demeure encore difficile à maîtriser tant que celle-ci est confrontée à plusieurs contraintes (aléas climatiques et faible maîtrise de l'itinéraire technique). Cette situation engendre une production faible et variable qui ne couvre que 30 à 35 % des besoins exprimés. Pour la période 2000-2005, la production du blé dur a varié de 4.8 à 20.2 millions de quintaux, avec une moyenne de 13.4 millions de quintaux (MADR, 2007). Pour la même période, la production des blés dur et tendre a varié de 7.6 à 29.6 millions de quintaux, soit une moyenne de 20.7 millions de quintaux.

Dans ce contexte, cette production est loin de couvrir la demande nationale qui est de plus en plus importante, suite au faible nombre de produits de substitution et au soutien des prix des céréales (Bedrani, 2004). Comparativement à la moyenne mondiale qui est de 29q/ha, et à celle des pays voisins qui est de 20q/ha (FAO, 2007), le rendement du blé dur stagne autour d'une moyenne de 10 q/ha, avec de fortes variations interannuelles. Hervieu *et al.*, (2006) rapportent, cependant, des progrès sensibles de la production algérienne de céréales, qui a presque doublée au cours de la période 1961-2004 (Tableau I.5).

Tableau I.5. Evolution de la production céréalière (10^3 t) des pays méditerranéens (Hervieu *et al.*, 06).

	1961-65	1981-85	2001-04	Taux croissance annuel(1963-2003)
Espagne	8,674.7	16,097.4	21,443.9	2.29
France	25,331.2	50,967.2	63,614.5	2.33
Italie	14,046	18,566.4	20,503.1	0.95
Grèce	2,521.8	5.1123	4,649.7	1.54
Portugal	1,609.1	1275	1,326.4	-0.48
Albanie	317.3	995.2	513.9	1.21
Malte	5.1	10.1	11.8	2.1
Algérie	1,770.9	1,805.7	3,189.8	1.48
Egypte	6,076.2	8,495.3	19,465.3	2.95
Liban	91.5	29.5	145.3	1.16
Maroc	3,159.1	3,939.8	6,594.1	1.86
Tunisie	926.6	1,329.9	1,465.1	1.15
Turquie	14,831.1	25,876.7	31,289.5	1.88
Total	79,360.6	134,500.5	174,212.4	---

I.2- Contraintes climatiques de la production du blé dur

I.2.1. Les basses températures

La variabilité climatique de l'étage bioclimatique semi-aride est principalement liée à la faiblesse et la mauvaise répartition de la pluviométrie dont la conséquence directe est la sécheresse. Dans ce contexte et selon Papy (1979), toute campagne, dont le cumul pluviométrique est inférieur à 300 mm, est systématiquement une année sèche.

Selon Chennafi (2008), les sécheresses, du début et de fin de cycle de la culture, sont les plus fréquentes. Mekhlouf *et al.* (2006) subdivisent la campagne agricole en deux saisons qui se succèdent, l'une froide, brève et relativement pluvieuse, allant d'octobre à février, et l'autre longue, chaude et sèche, de mars à septembre.

La variation des températures affecte aussi, au même titre que le manque d'eau, la croissance et le développement de la plante. Certains stades végétatifs et périodes du cycle de développement sont particulièrement plus sensibles à ces événements climatiques (Paulsen et Heyne, 1983 ; Gate *et al.*, 1997 ; Mekhlouf *et al.*, 2006).

Les effets des basses températures hivernales se manifestent par la destruction totale ou partielle d'organes végétatifs, notamment au cours de la phase de montaison. Le gel tardif constitue une autre contrainte pour les céréales des zones d'altitude, l'avènement de ce dernier coïncide généralement avec le stade méiose-épiaison. Il stérilise le grain de pollen et détruit l'ovaire naissant (Abassenne *et al.*, 1998).

Le gel tardif limite souvent de l'utilisation des variétés trop précoces au stade épiaison (Mekhlouf *et al.*, 2006). Paulsen et Heyne (1983) observent des dégâts très importants sur du blé tendre, au stade épiaison, dus à des températures de l'ordre de 0,3° C sous abri. La température de l'ordre de 6°C est rapportée comme étant destructive au stade formation du grain de pollen (Gate, 1995).

I.2.2. Le déficit hydrique et les hautes températures

Les hautes températures interviennent aussi comme une contrainte limitant le potentiel de production des zones semi-arides. Elles affectent les organes floraux, la formation du fruit, ainsi que le fonctionnement de l'appareil photosynthétique. La méiose et la phase de remplissage du grain sont particulièrement sensibles à l'élévation de la température. Les seuils entre 25° et 27° C sont rapportés comme étant très pénalisants. Le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain sont fortement affectés (Gate *et al.*, 1997 ; Fellah *et al.*, 2002).

Selon Abbassenne *et al.*, (1998) ainsi que Hargas(2002), les variétés tardives donnent de meilleurs rendements, au cours des campagnes relativement pluvieuses en fin de cycle. Lors des campagnes dont la fin de cycle est sèche, les variétés plus ou moins tardives souffrent des baisses de rendement liées à la coïncidence de la phase de remplissage du grain avec la période d'absence d'eau et d'élévation de la température. Ainsi Haddad (2009) rapporte que la variété Mohammed Ben Bachir, qui est relativement tardive pour la région de Sétif, en comparaison avec la variété Waha et Bousselem, se présente comme potentiellement la meilleure au cours de la campagne 2008/09 jusqu'au stade épiaison. La sécheresse associée à l'élévation de la température de l'air, qui s'installent dès le début du mois de mai 2009, font que cette variété se classe comme la moins performante.

Ehdaie *et al.*, (2006) rapportent que les températures supérieures à 30° C, après floraison, ont des effets négatifs sur le stockage des assimilés et sur la qualité du grain, à cause de l'échaudage. Au cours du remplissage du grain, les fortes températures affectent le poids du grain, les géotypes précoces évitent le plus souvent cette contrainte. En effet, selon Slafer *et al.*, (2005), au dessous de l'isohyète des 400 mm, la production des céréales devient aléatoire, dans la mesure où l'eau devient le principal facteur limitant. Les besoins de la céréale en eau sont compris entre 450 et 650 mm. La période la plus critique vis à vis du manque d'eau est comprise entre les 20 jours qui précèdent l'épiaison jusqu'à la fin du palier hydrique (Bouthiba *et al.*, 2006 ; Chennafi *et al.*, 2008).

La baisse du rendement grain est liée au stade végétatif où survient la contrainte hydrique et au degré de tolérance du géotype adopté. Le déficit hydrique est à craindre dès le mois de mai, à partir duquel les pluies se font rares et les températures de plus en plus élevées, engendrant une augmentation de la demande en eau de la part de plante à une phase critique où se détermine le rendement (Chennafi *et al.*, 2006). Le déficit hydrique retarde la levée, il provoque l'arrêt de l'émission de nouvelles talles, il accentue le taux de régression des talles montantes et augmente le taux d'avortement des fleurs (Gate *et al.*, 1997). Le déficit hydrique influence également le poids moyen du grain et raccourcit la durée de remplissage du grain alors que les températures élevées, au cours de la phase de remplissage stoppe l'accumulation de la matière sèche (Wardlaw et Moncur., 1995).

Dans une étude comparative des comportements des blés vis à vis de la sécheresse, Mekliche *et al.*, (1993) mentionnent que le déficit hydrique affecte différemment le blé dur par rapport au blé tendre. Le poids de 1000 grains est relativement plus pénalisé chez le blé dur qu'il ne l'est chez le blé tendre. Ces différences sont liées, entre autres, aux différences de durée du cycle de développement des deux espèces étudiées. L'amélioration de la production des zones arides et semi-arides doit nécessairement passer par la recherche de la tolérance aux stress afin d'arriver à une meilleure adaptation à la variabilité, de nature imprévisible, du milieu de production. Dans ce contexte, la caractérisation du milieu pour identifier les stress les plus fréquents, afin de leur trouver une stratégie d'évitement ou une source génétique de tolérance est une étape importante (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999).

Cependant, il est difficile de faire un progrès quelconque, lorsque les stress qui entravent le développement de la plante augmentent en nombre, et surtout, lorsqu'ils sont imprévisibles parce qu'ils sont de nature intermittente, pouvant se manifester à n'importe quel stade de la plante. Cependant la nature a doté la plante de mécanismes qui lui permettent de tolérer les stress prévalant à des degrés variables. L'exploitation de cette diversité peut déboucher sur une meilleure adaptation au milieu associée à la régularité des rendements.

I.3. Adaptation à la variabilité climatique du milieu

On entend par milieu, selon Papadakis (1938), l'ensemble des conditions climatiques, édaphiques et biotiques sous lesquelles se fait le développement de la plante du semis à la récolte. Ce milieu change continuellement pendant la durée du cycle de développement, il peut être considéré comme la somme d'une série de milieux instantanés. La plante, dans un tel milieu, change d'état de développement suite à son passage par différentes phases qui peuvent s'apparenter à des phénotypes instantanés. Le rendement grain final n'est en fait que la résultante et le compromis entre l'ensemble de ces milieux constituant l'environnement de production et les différents phénotypes instantanés extériorisés par la plante, en réponse à la série de milieux. Dans ce sens, l'adaptation, conférée par la tolérance à la variation du milieu, n'est en fait que la capacité du génotype (plasticité) à utiliser les disponibilités du milieu en s'y harmonisant au mieux (Garland et Kelly, 2006).

Les processus impliqués dans la tolérance aux stress abiotiques sont divers et complexes. Ils interviennent à différents niveaux de l'organisation de la plante, de la cellule à la plante entière. Ces processus se classent en deux catégories, ceux qui sont adaptatifs, et qui interviennent tout le long du cycle, comme le degré de précocité par exemple, et ceux qui sont inductifs, et qui n'apparaissent que durant l'avènement du stress, comme l'ajustement osmotique. La combinaison des deux catégories est probablement le meilleur moyen pour s'assurer d'une tolérance accrue vis à vis des stress associés à la productivité (Monneveux et This, 1997).

Le stress représente un excès ou un déficit dans un élément vital pour la plante, dont essentiellement l'eau, la température et les éléments minéraux. Ainsi le stress hydrique se développe au niveau de la plante lorsque le déficit en humidité atteint un seuil qui limite la croissance optimale de la plante et l'empêche de terminer son cycle. Ce manque d'eau peut être la conséquence d'absence de pluie, d'un sol léger ne pouvant pas retenir l'eau dans la zone racinaire ou la conséquence de l'effet des vents desséchants. Selon la durée du stress, la plante réagit et développe généralement des mécanismes qui lui permettent de contourner ou de gérer la situation. Ces mécanismes prennent place à différents niveaux de l'architecture de la plante, de la cellule à l'organe, voire la plante entière.

Levitt (1980) classe ces mécanismes en deux groupes, ceux qui permettent à la plante d'esquiver le stress "stress avoidance" et sont représentés par tout développement morphologique qui minimise l'intensité du stress perçu par la plante et ceux qui permettent à la plante de tolérer le stress "stress tolérance" dans ses tissus. Ces derniers sont des adaptations physiologiques et biochimiques que la plante met en jeu pour poursuivre normalement son cycle de développement, sans qu'elle soit trop perturbée.

I.3.1. Mécanismes de tolérance du stress

La tolérance du stress chez les plantes sauvages est souvent définie comme la survie au stress. Chez les plantes cultivées, elle est plus liée à la productivité (Passioura, 2004). Rosielle et Hamblin (1981) définissent la tolérance du stress comme la différence entre les rendements obtenus sous stress et en absence du stress. Elle est aussi définie comme la capacité de la plante à minimiser la baisse de rendement sous stress, comparativement à la baisse de rendement extériorisé par un génotype sensible au stress considéré (Fischer et Maurer, 1978 ; Blum, 1988 ; Reynolds *et al.*, 2005). La tolérance, c'est aussi le rendement relatif d'un génotype comparé au rendement d'autres génotypes avec lesquels il est testé (Sabaghnia *et al.*, 2006). La tolérance au stress prend diverses formes dont l'esquive du stress, l'évitement du stress et la tolérance proprement dite du stress (Levitt, 1980).

I.3.1.1. L'esquive du stress

L'esquive du stress, la plus rencontrée et utilisée en amélioration des plantes, est certainement la précocité ou le raccourcissement de la durée du cycle, qui est d'un avantage certain dans les milieux où le stress est plus intense vers la fin du cycle de la culture (Richards *et al.*, 2002 ; Mekhlouf *et al.*, 2006 ; Rebetzke *et al.*, 2007, Haddad, 2009). Une durée de cycle plus longue où la tardiveté peut être, sous certaines conditions, un avantage, car elle permet l'esquive du stress qui apparaît tôt (Ludlow et Muchow, 1990 ; Mekhlouf *et al.*, 2006). En absence de stress, les génotypes tardifs sont généralement plus productifs que les précoces. Ceci parce que les génotypes précoces font une moindre utilisation des disponibilités offertes par le milieu de production (Slafer *et al.*, 2005).

I.3.1.2. L'évitement du stress

L'évitement du stress est défini comme étant la capacité de la plante à maintenir un état interne satisfaisant en présence du stress (Blum, 1988). Dans le cas du stress hydrique, Levitt (1980) cite deux cas d'évitement du stress, représentés par les plantes économes en eau et les plantes dépensières d'eau. Les premières réduisent la transpiration alors que les secondes contrent le stress en cherchant l'humidité dans les profondeurs du sol. Pour ce faire, elles dérivent des glucides pour développer un système racinaire plus long, au détriment de la biomasse aérienne (Siddique *et al.*, 1990).

I.3.1.3. La tolérance du stress

La tolérance du stress est définie comme la capacité de la plante à croître sous stress. Selon Boyer (1976) et Ehdaie *et al.*, (2006) la translocation est le principal mécanisme qui est associé à la tolérance du stress. Selon Ehdaie *et al.*, (2006), la translocation est mise en œuvre, par la plante stressée, dès que l'activité photosynthétique est inhibée par le stress. Ce mécanisme est rapporté, dans plusieurs recherches, comme étant la principale source de remplissage du grain, sous stress sévère de fin de cycle (Bahlouli, 2006 ; Ehdaie *et al.*, 2006 ; Belkherchouche *et al.*, 2009 ; Bouzerzour et Benmahammed., 2009).

I.3.2. Architecture de la plante tolérante au stress

La littérature abonde en matière de caractères constitutifs de l'architecture de la plante qui aident à une meilleure adaptation et donc à la tolérance des stress (Blum, 1988 ; Loss et Siddique, 1994 ; Richards *et al.*, 2002 ; Slafer *et al.*, 2005 ; Reynolds *et al.*, 2005). Ainsi la grosseur du grain est une caractéristique désirable sous milieux contraignants. Elle aide

à une germination et levée rapides, donc à une installation précoce, ce qui permet à la végétation cultivée de couvrir rapidement le sol, de réduire l'évaporation du sol et d'initier la production de la biomasse (Rebetzke *et al.*, 2007).

Selon les mêmes auteurs (Rebetzke *et al.*, 2007), un coléoptile long est aussi une caractéristique désirable. En effet les génotypes qui arborent une telle architecture sont plus aptes à développer un système racinaire plus long, ce qui leur permet d'éviter les stress précoces, lors de l'installation de la culture. Cette caractéristique est aussi intéressante dans les régions où les semis sont à la volée, les génotypes à coléoptiles longs émergent même si la graine a été enfouie à plus de 7 cm, pour éviter les coups de sec au moment du semis (Rebetzke *et al.*, 2007).

Le port retombant associé à des feuilles fines, ayant un faible poids spécifique, sont des caractéristiques avantageuses sous climat méditerranéen, parce qu'elles aident à une rapide couverture du sol dès la levée. Cette couverture du sol réduit l'évaporation directe du sol, économisant l'eau pour la seule utilisation de la plante cultivée (Richards *et al.*, 2002). Ces caractéristiques contribuent aussi à une meilleure accumulation de la biomasse aérienne avant l'épiaison.

En effet, le rendement grain, obtenu sous conditions semi-arides, est le plus souvent dérivé de la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison. De tels génotypes possèdent la capacité de faire une bonne utilisation des eaux pluviales à un moment où ces dernières sont disponibles (Loss et Siddique, 1994). Ils se caractérisent par une bonne efficacité d'utilisation de l'eau (Sayre *et al.*, 1995). Un long col de l'épi, plein, est aussi intéressant comme caractère adaptatif dans les milieux caractérisés par les stress abiotiques. Ce caractère joue un rôle essentiel dans le stockage et la translocation des glucides solubles (Ehdaie *et al.* ; 2006).

La hauteur du chaume, variable selon le type de gènes contrôlant cette caractéristique, est importante aussi dans la translocation. En effet, les gènes de nanisme de type *Rht1* et *Rht2* réduisent la capacité de stockage des assimilés dans la tige de 35 % à 39 %, suite à une réduction de 21% de la hauteur du chaume (Borrell *et al.*, 1993). Cependant sous conditions favorables, l'avantage d'une paille haute à génotype à paille courte (*rht*) ne s'exprime en matière de stockage et de translocation. Sous stress, la contribution des génotypes à paille haute est relativement plus importante que celle des génotypes à paille naine (Daniels *et al.*, 1982 ; Ehdaie *et al.*, 2006, Belkherchouche *et al.*, 2009).

La présence des barbes est importante, car sous stress sévère, les barbes sont le dernier organe qui est encore le siège d'une activité photosynthétique, activité qui peut contribuer jusqu'à 40 % au remplissage du grain (Evans *et al.*, 1972 ; Gallagher *et al.*, 1976). Xu *et al.* (2009) rapportent que l'activité photosynthétique de l'épi du blé est relativement plus tolérante vis-à-vis du stress comparativement à l'activité photosynthétique de la feuille étendard.

Un système racinaire profond permet à la plante de continuer à avoir accès à l'humidité du sol, le plus tardivement possible au cours du cycle de développement de la culture. Cette caractéristique est cependant difficilement mesurable sur un nombre important de lignées sous sélection. Cette caractéristique est le plus souvent liée à la teneur relative en eau foliaire, mesurée à l'aube et à la dépression de la température de la canopée, relativement à celle de l'air, mesurée au midi solaire (Balota *et al.*, 2007). La discrimination isotopique du carbone ¹³C ainsi que le contenu en cendre du grain sont autant de caractères qui avantagent les génotypes qui les possèdent sous stress (Rebetzke *et al.*, 2002).

I.4-La sélection pour la tolérance du stress : adaptation au milieu

I.4.1. Comment estimer la tolérance du stress ?

Suite à la complexité d'expression de la tolérance en tant que caractère, en comparaison avec d'autres caractères directement mesurables comme la hauteur ou la précocité, les efforts faits pour améliorer la tolérance se font sur le rendement en grain qui est le caractère d'intérêt dans le processus de la sélection. Diverses méthodes sont proposées pour évaluer la tolérance ou l'adaptation, sur la base du rendement en grain ou des composantes du rendement.

En effet, la valeur d'un génotype ne dépend pas seulement de son potentiel génétique mais également de sa capacité à maintenir, à un niveau acceptable, ses performances sous différentes conditions agro-climatiques. Parmi ces méthodes figurent l'analyse de la variance, la régression conjointe, les modèles multiplicatifs et les méthodes non paramétriques basées sur le calcul des indices (Zobel *et al.* 1988 ; Kang, 1993 ; Vargas *et al.*, 1999 ; Sabaghnia *et al.*, 2006 ; Gauch, 2006).

I.4.2. La stabilité

En amélioration des plantes, la sélection pour la tolérance au stress est approchée par la sélection pour l'adaptation à la variation des conditions de croissance. Ainsi la sélection pour la stabilité du rendement en grain d'une localité à l'autre ou d'une campagne à l'autre, est une sélection pour la tolérance et l'adaptation. La stabilité est une caractéristique du rendement d'un génotype donné, à travers un ensemble de milieux. Elle peut être de nature statique (Becker et Léon, 1988), ou de type I (Lin *et al.*, 1986).

Dans ce cas, elle est mesurée par la variance inter-milieux. Elle peut être de nature dynamique, dans le cas où l'on compare le comportement d'un génotype par rapport aux comportements des autres génotypes avec lesquels il est évalué. La stabilité dynamique subdivisé par Lin *et al.*, (1986) en types II, III et IV. La stabilité de type II correspond à l'écovalence de Wricke (1962). La stabilité de type III est celle décrite par le coefficient de la régression conjointe de Finlay et Wilkinson (1963). La stabilité de type IV se rapporte aux variations des performances d'un génotype dans le temps, d'une année à l'autre (Lin et Binns, 1988).

I.4.3. L'interaction Génotype x environnement

I.4.3.1. Le modèle additif de l'anova

Les génotypes de céréales se distinguent par des caractéristiques de production comme le rendement. Ces différences, qui correspondent à un effet génétique, sont mises en évidence et mesurées dans un milieu donné. Mais selon les milieux, elles sont d'ampleur variable. Ainsi, certains génotypes ont des performances élevées dans certains milieux, mauvaises dans d'autres, alors que d'autres variétés ont un comportement inverse, ce qui a pour conséquence un changement d'ordre de classement des variétés entre milieux.

La variation des performances et des classements des génotypes dans les différents milieux, sont, généralement, dus aux différences de sensibilité des génotypes aux contraintes du milieu qui perturbent le déroulement normal du cycle de la culture. Cette variabilité des réponses des génotypes aux milieux est appelée interaction génotype x milieu ou génotype x environnement (G x E). Elle est mesurable au même titre que les effets principaux des génotypes et des milieux. Brancourt-Hulmel *et al.*, (2005) mentionnent que l'effet des milieux est le plus important, représentant jusqu'à 80 % de la variation totale, avec un poids particulièrement important de l'effet des années. L'effet principal des génotypes et l'interaction, qui sont d'intérêt pour la sélection, ne représentent que 10 à 25 % de la variation totale.

La réponse différentielle des variétés aux milieux, *i.e.* la présence de l'interaction G x E, complique énormément le travail de sélection dont la mesure où la décision concernant les performances d'un génotype donné n'est pas entièrement fiable, car aucun des résultats de chaque milieu pris individuellement, ni les performances moyennes, ne suffisent à décrire correctement le comportement du génotype. En effet, le jugement apporté sur la performance moyenne et la moyenne calculée sur l'ensemble des milieux, n'est pas fiable, car le génotype en question peut présenter des performances très mauvaises dans certains milieux et des performances au-dessus de la moyenne dans d'autres milieux. Pire encore, l'extrapolation des résultats obtenus dans un milieu donné à d'autres milieux est plus délicate.

Dans le cas où le milieu désigne la localité, la sélection pour l'adaptation spécifique est suggérée, pour peu qu'elle soit associée à la régularité des performances dans le temps. Dans le cas où le milieu désigne l'année, alors l'adaptation générale est la plus recherchée, puisqu'elle devient synonyme de stabilité temporelle. La connaissance de la stabilité du comportement des génotypes est donc indispensable aussi bien pour le sélectionneur que pour le producteur qui est intéressé par des variétés, dont les performances sont stables vis-à-vis de la variabilité interannuelle du climat.

Pour obtenir une telle information, il est nécessaire de conduire un réseau d'essais sur la diversité des comportements variétaux dans l'espace et dans le temps en vue d'affiner l'analyse statistique des résultats de ce réseau d'essais pour mieux expliquer et exploiter l'interaction GxE (Annicchiarico *et al.*, 2006). L'analyse des résultats d'un réseau d'essais débute généralement par des analyses de la variance réalisées par site d'essais (milieu) pour mieux apprécier la précision des résultats et en juger de la signification des différences observées entre génotypes. Seuls les sites montrant des différences significatives entre génotypes et assez précis (coefficient de variation ou écart type résiduel pas trop élevé) sont inclus dans une analyse intersites combinée.

La signification de l'interaction génotype x milieux dans une analyse de la variance combinée indique que le modèle additif de l'analyse de la variance est inapte pour expliquer les différences du comportement des génotypes dans les différents lieux. Dans ce cas, il est fait appel à d'autres méthodes statistiques (DeLacy *et al.*, 1996). Ces méthodes d'analyse permettent d'identifier les milieux et les génotypes responsables de l'interaction. Ainsi Lin *et al.*, (1986) ont élaboré un inventaire des méthodes d'analyse des réseaux d'essais des comportements variétaux. Ces auteurs ont fait référence à Wricke (1962) qui suggère de calculer la contribution de chaque génotype ou chaque milieu à l'interaction, pour identifier les génotypes ou les environnements qui sont responsables de l'instabilité des comportements.

1.4.3.2. La régression conjointe et les modèles "AMMI" et factoriel

Finlay et Wilkinson, (1963) ainsi que Eberhart et Russel, (1966) proposent la technique de la régression conjointe qui décompose l'interaction et permet de décrire les génotypes en fonction de leur aptitude à valoriser les potentialités des milieux étudiés ou futurs. Cette technique n'explique cependant qu'une faible partie de l'interaction, laissant l'essentiel inexpliqué, sous forme résiduelle de la régression (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005 ; Kadi *et al.*, 2010). Zobel *et al.*, (1988) proposent le modèle multiplicatif dit AMMI (Additive Main effect Multiplicative Interaction). En revanche, ce modèle a permis d'expliquer une plus grande partie de l'interaction (plus de 60 %), sous forme de composantes multiplicatives (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005 ; Dodig *et al.*, 2008 ; Kadi *et al.*, 2010). Ce modèle présente, cependant, l'inconvénient que les composantes multiplicatives sont peu liées à des facteurs génotypiques ou environnementaux, ne permettant pas d'expliquer totalement les causes de l'interaction (Voltas *et al.*, 2005).

En effet, l'idéal est d'utiliser des modèles qui font intervenir des co-variables génotypiques ou environnementales suggérant une interprétation biologique de l'interaction (Nachit *et al.*, 1995, Annicchiarico *et al.*, 2002). De tels modèles sont représentés par la régression factorielle biadditive dans laquelle les composantes multiplicatives du modèle AMMI correspondent à une combinaison linéaire de co-variables génotypiques ou environnementales (Lecomte *et al.*, 2002 ; Voltas *et al.*, 2005). Cette technique apporte une explication agronomique de l'interaction sous forme d'une estimation de la sensibilité ou de la tolérance des génotypes à la variation des facteurs environnementaux.

1.4.2.3. La classification et la caractérisation des milieux et des génotypes

L'utilisation de ces modèles nécessite des études portant sur la caractérisation des milieux et des réponses du végétal à ces milieux. Ces études permettent d'identifier les facteurs limitants qu'il faut traduire sous forme de co-variables explicatives des variations des comportements des génotypes entre milieux et donc de l'interaction G x E (Epinat-Le Signor *et al.*, 2001 ; Van Leewijk *et al.*, 2004). Une telle démarche a été appliquée à des essais de comparaison de variétés par Brancourt-Hulmel *et al.*, (1999), utilisant des génotypes témoins (Probes) (Cooper et Fox, 1996) dont le comportement, en absence des contraintes, est connu. Ceci permet d'identifier les facteurs limitants et d'en évaluer l'effet sur les différents génotypes testés.

Les causes explicatives de la présence d'une interaction G x E significative sont diverses. Ainsi la température, la localisation géographique, le rayonnement, le bilan hydrique, la pluviométrie, le stress hydrique, la date de floraison et le gel figurent parmi les causes de l'interaction (Voltas *et al.*, 1999 ; Epinat-Le Signor *et al.*, 2001 ; Reynolds *et al.*, 2002 ; Voltas *et al.*, 2005). Brancourt-Hulmel *et al.* (2005) décrivent les contraintes du milieu sur des génotypes révélateurs par des écarts du nombre de grains/m² et de la perte de poids de 1000 grains par rapport à des valeurs de référence. En ce qui concerne l'environnement de sélection, plusieurs méthodes biométriques ont été proposées pour identifier les milieux les plus intéressants pour la sélection. Ces méthodes sont basées sur l'utilisation des coefficients de corrélation inter-lieux, qui identifient les milieux dissimilaires et ceux qui sont similaires (Yau *et al.* 1995 ; Abou El Fitouh *et al.*, 1969).

La régression conjointe qui permet d'identifier les milieux où les réponses génotypiques sont proches de la moyenne des milieux, ceux qui révèlent les variétés à haut rendement, et ceux qui maximisent les différences entre génotypes. Dans le cas où l'on considère que le milieu intéressant est celui qui génère une forte interaction, l'écovalence de Wricke (1962), calculée pour les milieux, permet de supprimer les sites qui sont une source d'une faible interaction. La classification hiérarchique "clustering" des lieux permet aussi d'identifier

ceux qui sont divergents de ceux qui sont similaires, et donc apportant le même type d'information. Elle cherche une minimisation de la variation entre sites d'un même cluster et une maximisation de la variation entre sites appartenant à différents clusters. Ceci pour obtenir une homogénéité de comportement des variétés à l'intérieur des milieux d'un même cluster et ainsi identifier les variétés les mieux adaptées à chaque cluster.

Chapitre II : Etude de la variabilité interannuelle des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides

Résumé.

Les résultats de l'étude de l'interaction génotype x année des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) testées au cours de six campagnes agricoles consécutives (1998-2003), sous conditions semi-arides indiquent peu de reproductibilité de l'information concernant le rendement grain suite au changement de l'ordre de classement des génotypes d'une année à l'autre. En effet, au cours des six campagnes, hormis Béliouni, MBB et Sémito qui figuraient parmi les moins performants, les autres génotypes tenaient la tête du classement au moins une fois. La présence de l'interaction génotype x années est suggérée par le ratio $\sigma^2_{\text{maxi}}/\sigma^2_{\text{mini}}$ qui varie de 1 à 12.1. L'analyse de la variance combinée indique que la somme des carrés des écarts (SCE) des traitements est constituée de 42.41% dus à l'effet année, 8.43% à l'effet génotype et 49.15% à l'interaction. La régression conjointe est inefficace dans l'analyse des données d'une telle expérimentation dont elle n'explique que 12.76%, de la SCE de l'interaction. Par contre le modèle AMMI s'avère plus adapté, expliquant 84.0% de la SCE de l'interaction. Le biplot AMMI₁ décrit bien la complexité de l'interaction associée aux comportements des 15 génotypes évalués. Du point de vue sélection, il s'avère difficile d'identifier un génotype adapté à toutes les campagnes et possédant, en plus, un rendement élevé. Sur les 6 campagnes, le génotype le plus stable est Mrb₁₆/Ente//Mario, qui se distingue aussi par un rendement moyen supérieur à la moyenne générale des 6 campagnes. Le génotype le plus performant, en moyenne des 6 campagnes, mais dont le comportement est très irrégulier, est Cyprus₁. Ceci suggère que la stabilité ne va pas de paire avec la performance. La classification hiérarchique des campagnes et des génotypes suggère l'existence de facteurs limitants très différents qui se sont exprimés lors des différents groupes de campagnes pour les différents groupes de génotypes.

Mots clés. *T. durum* – interaction – AMMI – régression – classification - adaptation.

Abstract.

*The results of the study of the genotype x years interaction of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties tested during six consecutive cropping seasons (1998-2003), under semi-arid conditions, indicated the lack of reproducibility of the yield information because genotype rank changes from one year to another. During the six cropping seasons, except Béliouni, MBB and Simeto which performed always poorly the remaining genotypes ranked*

among the top yielding at least once. The presence of genotype \times years is suggested by the ratio $\sigma^2_{max}/\sigma^2_{mini}$ which ranged from 1 to 12.1. The combined analysis of variance indicated that the treatment SS consisted of 42.41% due to the year effect, 8.43% to the genotype effect and 49.15% to the interaction. The joint regression explained only 12.76% of the interaction SS and was less efficient in analyzing the data of this experiment. The AMMI model was more appropriate, explaining 84.0% of the interaction SS. The AMMI 1 biplot described fairly well the complexity of the interaction that is associated with the behavior of the 15 evaluated genotypes. From the selection point of view, it is difficult to identify a genotype adapted to all cropping seasons and showing high yield. Over the six cropping seasons, the most stable genotype was Mrb 16 /Ente// Mario which exhibited a mean yield higher than the overall average of 6 cropping seasons and 15 génotypes. The best yielding genotype, on average, was Cyprus 1 which exhibited however an irregular yielding pattern. This suggests that stability is not linked to yield performance. Cropping seasons and genotypes clustering suggested the existence of limiting factors that have very different effects within the various groups of genotypes and cropping seasons.

Keyword s. *T. Durum* – Interaction – AMMI – regression – classification - adaptation.

Introduction

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une place particulière dans la céréaliculture algérienne, place qu'il doit au mode de consommation alimentaire de la population qui est basé sur la semoule du blé dur, au faible nombre de cultures qui viennent assez bien en sec qu'en irrigué et au prix d'achat assuré par l'état. La culture du blé dur est pratiquée en pluviale, dans un environnement climatique très variable. Sous un tel environnement, l'utilisation des variétés rustiques reste de règle, quoique des efforts sont déployés pour sélectionner des génotypes réguliers et plus performants.

Le fruit de la sélection, pratiquée jusqu'à lors, n'est partiellement exploité que dans les milieux climatiquement favorables, représentés par les plaines intérieures et le littoral. L'adoption de nouvelles variétés reste relativement faible sur les hautes plaines semi-arides, comparativement à l'utilisation des variétés locales. Dans cette région, les nouvelles obtentions, au même titre d'ailleurs que les variétés locales, présentent des rendements très irréguliers d'une année à l'autre et d'une localité à l'autre (Nouar *et al.*, 2010 ; Benmahammed *et al.*, 2010).

Poursuivant ces objectifs, la sélection cherche à identifier des génotypes au potentiel plus élevé et associé à la stabilité des performances. Pour ce faire, des essais comparatifs du rendement sont conduits sur plusieurs sites et au cours de plusieurs années pour identifier de tels génotypes. Considérant que la performance et la stabilité peuvent ne pas être exclusives, le matériel végétal, sous sélection, est soumis à la variation climatique du site.

Une telle stratégie favorise, selon Basford et Cooper (1998), la sélection pour la tolérance du stress et la performance. Les résultats de certaines recherches suggèrent, cependant, que la sélection sous stress, favorise plutôt la stabilité. Ceci présente l'avantage de minimiser les risques associés à des rendements nuls, aspect très utile dans une agriculture de subsistance, comme celle des hautes plaines (Ceccarelli *et al.*, 1998 ; Bahlouli *et al.*, 2005).

Selon Rosielle et Hamblin (1981) ainsi que Dodig *et al.*, (2008), un potentiel de rendement élevé, associé à la stabilité des performances sont deux caractéristiques difficiles à estimer dans des milieux variables. En effet, la variation environnementale induit le plus souvent l'interaction génotype x environnement (Yan et Hunt, 2001). La présence d'une interaction élevée affecte négativement l'efficacité de la sélection, suite au changement de rang des génotypes évalués d'un milieu à l'autre. En effet, certains génotypes présentent des rendements élevés dans certains milieux et des rendements faibles dans d'autres milieux, alors que la situation inverse se présente pour d'autres génotypes (Kadi *et al.*, 2010). Ce comportement des génotypiques oblige les sélectionneurs à s'intéresser à l'adaptation génotypique (Gauch et Zobel 1996 ; Voltas *et al.*, 2005).

De nombreuses études ont été réalisées sur l'analyse de l'interaction GxE pour identifier des génotypes stables et performants sur un grand ensemble de milieux (adaptation générale ou « adaptabilité ») ou sur un ensemble plus restreint d'environnements (adaptation spécifique) (Yan *et al.*, 2000). Plusieurs méthodes statistiques ont vu le jour pour analyser la variation des rendements observés dans un réseau d'essais et où l'interaction GxE est plus significative. Parmi ces méthodes, figurent la régression conjointe, le modèle AMMI et le « clustering » (Finlay et Wilkinson 1963 ; Lin *et al.*, 1986 ; Becker et Léon, 1988 ; Zobel *et al.*, 1988 ; Crossa *et al.*, 1990 ; Yau et Hamblin, 1994 ; Vargas *et al.* 1999 ; Yan *et al.* 2000 ; Voltas *et al.*, 2005).

L'objectif de la présente contribution est d'étudier la variation interannuelle des rendements de variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) testées au cours de six (6) campagnes agricoles consécutives, sous conditions semi-arides.

II.1. Matériels et méthodes

II.1.1. Site expérimental

L'étude a été conduite à la Station Expérimentale Agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures -ITGC- de Sétif, située à 5 kilomètres, au Sud-Ouest de la ville Sétif et à 60 kilomètres de la mer. La station est située aux coordonnées 36° 9' N et 5° 21' E à une altitude de 1081 m. La zone appartient au domaine 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 cumul pluviométrique moyen de cette zone, correspondant au cycle de la plante (septembre à juin) est de 362 mm, pour la période 1981-2000. 80 % des années ont un cumul inférieur à 230 mm (Chennafi *et al.*, 2008). 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 1.35 % de matière organique. Il a une composition de 13.9 % de sable, 41.3 % de limon et 44.7 % d'argile (Kribaa *et al.*, 2001 ; Kribaa, 2002). La teneur moyenne en eau, à la capacité au champ et celle du point de flétrissement sont de l'ordre 25 et 12 %, respectivement, la densité du sol est de 1,35 g/cm et le taux d'infiltration est de 8,3 mm/h (Chennafi *et al.*, 2006).

II.1.2. Expérimentation

II.1.2.1. Matériel végétal

Quinze géotypes de blé dur très divergents pour leur degré de précocité au stade épiaison, pour leur biomasse accumulée au stade maturité, par leur hauteur du chaume et par leurs statuts hydriques et caloriques foliaires ont été sélectionnés pour cette étude parmi un ensemble de variétés suivies dans le cadre du programme WANADIN (West Asia and North Africa Durum Improvement Network) en collaboration avec le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS), et l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) (Bouzerzour *et al.*, 1998).

Le matériel végétal retenu est constitué de variétés Algériennes : Beliouni₃₈₅₂ et MBB, des lignées de l'ICARDA (International Center of Agricultural Research in Dry Area): Belikh₂, Bicare, Daki Deraa, Heider, Heider//Martes/Huevos de Oro (synonyme Bousssaalem), Massara₁, et Mrb₅ et Waha; des variétés européennes : Adamillo/Duillo//Simeto (ADS) et Simeto, qui sont d'origine italienne, Cyprus₁, d'origine chypriote et la lignée avancée du CIMMYT (Centro International de Mejoramiento de Maíz y Trigo) Mrb₁₆/Ente/Mario.

II.1.2.2. Dispositif expérimental

Le matériel végétal cité ci-dessus a été mis en place sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif, au cours des six campagnes agricoles consécutives 1997/98 à 2002/2003, dans un dispositif en blocs complètement randomisés avec 3 répétitions. La parcelle élémentaire a 6 rangs de 5 m de long avec un espace inter-rang de 20 cm, soit une superficie de 6 m². Le précédent cultural de la parcelle support des essais est une jachère travaillée.

Les techniques culturales appliquées aux essais se résument à un labour profond suivi de deux passages croisés du cover crop, réalisés au cours de l'année de jachère. Le lit de semis est préparé par un passage du cover crop. Cent (100) kg ha⁻¹ de super phosphate à 46% sont apportés au moment des semences et incorporés avec un passage de cover crop. Cent (100) kg ha⁻¹ d'urée sont apportés au stade tallage, au mois de mars, après le désherbage chimique au GranStar [Tribenuron Methyl], à raison de 12 g ha⁻¹.

II.1.2.3. Suivi et notations

La date d'épiaison a été notée par parcelle élémentaire, estimée par le nombre de jours calendaires du 1^{ier} janvier à la date de sortie de 50 % des épis. La hauteur des plantes est mesurée à maturité, du niveau du sol jusqu'à la base de l'épi, juste avant la récolte mécanique des essais. Un rang de 1 m de long est récolté manuellement pour avoir les estimations de la matière sèche accumulée, le nombre d'épis et le poids de 1000 grains. Le rendement en grain est déterminé suite à la récolte mécanique des essais. Le nombre moyen de grains par épi et par mètre carré sont déduits des valeurs parcellaires du rendement, des épis et du poids de 1000 grains.

II.1.2. 4. Analyses des données

Parmi les nombreux caractères mesurés, seul le rendement grain est analysé dans ce chapitre. Ce dernier a été analysé par campagne agricole, ayant pour objet de tester l'effet génotype. L'absence d'un effet génotype significatif, élimine l'essai de l'analyse de la variance combinée sur les 6 campagnes agricoles. Cette dernière analyse est réalisée

en considérant que l'effet campagne est aléatoire, alors que celui des génotypes est fixe. De ce fait, les conclusions à tirer au sujet des campagnes s'appliquent à n'importe quelle campagne, alors que celles concernant les génotypes ne sont applicables qu'à l'échantillon de variétés étudiées (Steel et Torrie, 1980 ; Mc Intosh, 1983).

Pour effectuer les analyses du modèle AMMI et la régression conjointe, la procédure "cross site analysis" de CropStat 7.2.3 (2008) a été utilisée. Le rendement de chaque génotype est régressé sur un indice qui représente la capacité de production de la campagne pour obtenir le coefficient de régression caractéristique du génotype considéré. L'indice du milieu est calculé comme la différence entre la moyenne de tous les génotypes d'une campagne ($Y_{.j}$) déduite de la moyenne générale de toutes les campagnes ($Y_{..}$).

La classification des génotypes et des campagnes est sur la base de l'interaction du rendement qui est déduite à partir de la relation suivante : $Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..}$ (Annicchiarico, 2002). L'arbre hiérarchique de la classification "clustering" est réalisé avec le programme Past (Hammer *et al.*, 2001). Ainsi, l'objet de la classification "cluster analysis" consiste à regrouper les individus qui se ressemblent le plus dans un même groupe, et classer les individus dissimilaires dans différents groupes.

Pour cette analyse la méthode de Ward, a été utilisée. Cette méthode s'appuie sur le principe de l'analyse de la variance, de sorte que la distance qui sépare deux clusters est basée sur la somme des carrés des écarts. Le logiciel Past (Hammer *et al.*, 2001) a été utilisé aussi pour calculer les coefficients de corrélation du rang de Spearman, pour étudier la similitude des comportements des génotypes entre campagnes (Yau *et al.*, 1994).

II.2. Résultats et discussion

II.2.1. Variation du rendement en grain intra et inter années

II.2.1.1. Modèle additif de l'anova

Dans le processus de sélection, les essais comparatifs de rendement en grain sont une étape essentielle qui débouche généralement sur l'identification de nouvelles variétés plus performantes, représentant le gain génétique réalisé. La répétition de ce type d'essais n'est pas nécessaire si la reproductibilité de l'information concernant le rendement en grain (dite aussi héritabilité généralisée) est élevée.

Cette reproductibilité de l'information suppose que la classification des génotypes reste plus moins constante quelque soit l'essai. La répétition, spatio-temporelle, des essais s'impose si l'ordre de classement des génotypes change d'une année à l'autre ou d'un lieu à l'autre, pour le même matériel végétal testé.

Dans le cas de la présente étude, les analyses de la variance du rendement en grain constituent un caractère d'intérêt ciblé dans le cas des essais comparatifs, réalisées par campagne et montrent un effet génotype hautement significatif (Tab. II.1). Ces résultats suggèrent l'existence de la variabilité génotypique exploitable par année. L'étude des moyennes de rendement indique des différences de performances entre génotypes par année, suggérant la possibilité d'une sélection efficace (Tab. II.2).

Chaque campagne se caractérise par une série de géotypes performants qui lui sont spécifiques. Au cours des six campagnes étudiées, seuls les géotypes Béliouni, MBB et Sémito ne figuraient pas parmi les géotypes les plus performants. Les autres géotypes se classaient, au moins une fois, parmi les plus performants, en prenant la tête de classement des performances du rendement (Tab. II.2).

Ainsi Cyprus₁, Daki, Massara₁, Mrb₁₆/Ente//Mario et Waha, se classent parmi les géotypes les plus performants deux campagnes sur six, alors que Mrb₅ y figure par trois fois. En moyenne des six campagnes, les géotypes présentant les rendements les plus élevés sont Cyprus₁ et Heider/Martes// Huevos de Oro, synonyme Bousselem (Tab.II.2).

Source	Totale	Blocs	Géotypes	Résidus
Ddl	44	2	14	28
1997/98	2102.61	2014.87	4859.77**	730.29
1998/99	6626.65	400.56	20271.50**	248.96
1999/00	15408.80	482.45	47808.80**	275.06
2000/01	2256.39	1670.56	6065.79**	393.53
2001/02	855.33	151.09	2506.42**	80.08
2002/03	1401.77	1077.96	3780.61**	235.48
Source	Ddl		CME	
Camp			5	17580**
Bloc/camp			12	970
Géotype			14	12500**
G x C			70	14600**
Erreur			168	330

Tableau II.1. Moyenne des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grain faite par campagne et pour les 6 campagnes combinées.

Tableau II. 2. Rendements moyens et variances des différents géotypes évalués, mesurées par campagne.

**Chapitre II : Etude de la variabilité interannuelle des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.)
sous conditions semi-arides**

N ^o Géno	Génotype	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	Yi.	S ² _i x103	S ² _M /S ² _m
1	Ads	360.7 <u>a</u>	253.3	392.7	359.0	160.7	146.7	278.8	11.6	6.0
6	Belikh ₂	266.7	305.0	288.0	306.7	188.7	255.7 <u>a</u>	268.4	1.9	1.0
15	Beliouni	256.7	374.3	287.0	291.0	152.7	176.3	256.3	6.6	3.4
8	Bicre	283.7	273.3	219.7	397.7	161.3	247.0 <u>a</u>	263.8	6.2	3.2
4	Cyprus ₁	354.3 <u>a</u>	227.3	557.3	307.0	257.0 <u>a</u>	211.3	319.0	16.4	8.4
10	Daki	349.7 <u>a</u>	178.3	344.7	318.3	169.0	246.7 <u>a</u>	267.8	6.7	3.4
9	Deraa	283.3	200.0	593.0 <u>a</u>	284.3	179.3	215.7	292.6	23.5	12.1
12	Heider	300.0	385.0	306.3	359.3	204.3	234.3 <u>a</u>	298.2	4.9	2.5
11	Hmo	254.3	338.3	500.0	332.7	197.0	234.3 <u>a</u>	309.4	11.8	6.1
2	Massara ₁	336.3 <u>a</u>	308.3	190.7	255.3	178.0	241.3 <u>a</u>	251.7	3.9	2.0
13	Mbb	288.0	328.3	202.0	326.0	147.0	162.7	242.3	6.7	3.5
7	Mrb ₁₆	342.3 <u>a</u>	243.3	335.3	327.0	200.7	240.3 <u>a</u>	281.5	3.7	1.9
3	Mrb ₅	325.0 <u>a</u>	426.6 <u>a</u>	240.7	321.7	163.3	258.3 <u>a</u>	289.3	8.1	4.2
14	Simeto	241.3	136.6	236.3	294.0	186.7	219.7	219.1	2.9	1.5
5	Waha	331.7 <u>a</u>	333.3	308.3	431.7 <u>a</u>	149.0	180.3	289.1	11.2	5.8
	Y.j	304.9	287.4	333.5	327.4	179.6	218.0	275.2		
	Ppds ₅ %	45.2	29.3	27.73	33.1	15.0	25.7			
	CV%	9.9	6.5	6.2	7.2	6	8			

a = Meilleurs génotypes par année, dont les moyennes ne sont pas significatives au seuil de 5% selon le tests de la Ppds5%.

Le changement des classements des génotypes, d'une année à l'autre, est une indication de la présence de l'interaction génotype x campagne. En effet, le degré de ressemblance entre campagnes agricoles est très faible, comme l'indiquent les coefficients de corrélation du rang de Spearman qui ne sont pas significatifs (Tab.II.3). La présence de l'interaction est aussi suggérée par la taille de la variance inter-campagnes de chaque génotype. Le ratio variance maxi/variance mini varie de 1 à 12.1, pour les génotypes extrêmes Belikh₂ et Deraa. Belikh₂ est plus régulier, avec un rendement qui varie relativement moins d'une année à l'autre, alors que Deraa est le plus variable, parmi les 15 génotypes évalués (Tab.II.2). La moyenne des rendements des six campagnes par

génotype est liée à la variance inter-campagnes, suggérant que les meilleures performances moyennes sont la caractéristique des génotypes dont le rendement grain varie de manière significative d'une année à l'autre (Fig. II.1).

Tableau II.3. Coefficient de corrélation de rang de Spearman (Spearman's r) inter-campagnes du rendement grain.

	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03
97/98		-0.188@	0.273	0.203	-0.023	-0.085
98/99	<i>0.485</i>		-0.344	0.279	-0.223	0.058
99/00	<i>0.305</i>	<i>0.191</i>		0.105	0.408	-0.256
00/01	<i>0.450</i>	<i>0.294</i>	<i>0.696</i>		-0.117	-0.082
00/02	<i>0.913</i>	<i>0.405</i>	<i>0.115</i>	<i>0.664</i>		0.329
00/03	<i>0.753</i>	<i>0.828</i>	<i>0.338</i>	<i>0.761</i>	<i>0.212</i>	

@ =Valeur du coefficient de corrélation de rang en dessous de la diagonale (en italique), la probabilité associée est en dessus de la diagonale,.

Ces résultats indiquent aussi que 12 génotypes parmi les 15 évalués, possèdent le potentiel de rendement qui les classe parmi les plus performants. Cependant ce classement est dépendant de la campagne considérée. Ceci veut dire que dans le processus de sélection, certains génotypes sont éliminés parce qu'ils ont été évalués au cours des campagnes qui ne leur sont pas favorables et non pas parce qu'ils ne possèdent pas le potentiel de rendement désiré.

L'analyse de la variance réalisée pour l'ensemble des années confirme la présence d'une interaction et d'un effet année hautement significatif et d'un effet génotype non significatif, testé relativement à la variance de l'interaction comme le suggère Annicchiarico (2002) (Tab. II.1). La présence de l'interaction GxE significative indique que la sélection doit être faite par milieu et non pas sur l'ensemble des milieux. Ceci serait possible, si le milieu représentait un site spatial, dans la mesure où le milieu représente l'année. Dans ce cas, ceci n'est pas possible.

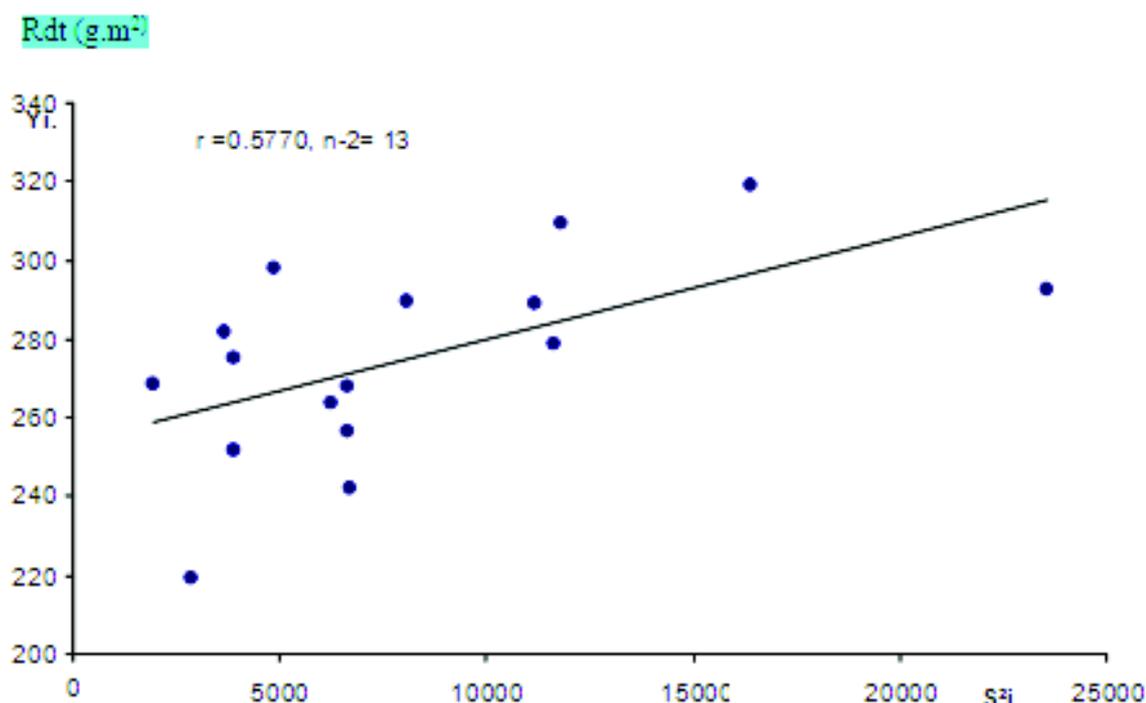


Figure II.1. Relation entre la moyenne du rendement et la variance inter-campagnes des différents géotypes évalués

De ce fait, le modèle additif de l'ANOVA n'est adapté pour analyser les données de ces essais. En effet, Samonte *et al.*, (2005) mentionnent que lorsque l'interaction GxE est significative, l'analyse de la variance classique n'est pas adaptée pour expliquer l'interaction. Dans de telles situations, il faut recourir à l'utilisation des modèles linéaires ou multiplicatifs. Le modèle linéaire, en particulier, permet d'analyser la réactivité des géotypes à la variation climatique des campagnes pour identifier et sélectionner ceux qui sont plus plastiques, dits géotypes passe-partout, valorisant tous les environnements.

II.2.1.2. Régression conjointe et AMMI

II.2.1.2.1. La régression conjointe

Les résultats de l'analyse de la variance combinée indiquent que l'effet principal année absorbe à lui seul près de 42.41% de la SCE des traitements, l'effet principal géotype explique 8.43%, alors que l'interaction explique près de 50% (Tab.II.4). La variation importante du rendement entre les différentes campagnes justifie l'utilisation de la régression et de l'analyse AMMI, pour expliquer l'interaction et éventuellement identifier les géotypes à large adaptation.

Source de variation	df	SCE	MCE	F _{obs}	% SCE
Traitements	89	207.32	3.04	9.21**	100
Campagne (C)	5	87.92	17.58	18.12**	42.41
Bloc E	12	1.16	0.97	2.46**	--
Génotype (G)	14	17.49	1.25	0.86 ^{ns}	8.43
G x C	70	101.91	1.46	4.42**	49.15
Hétérogénéité des régressions	14	13.00	0.93	0.58 ^{ns}	12.76
Déviaton de la régression	56	88.91	1.59	4.82**	87.24
IPCA ₁	18	67.23	3.74	8.31**	65.97
IPCA ₂	16	18.35	1.14	2.53**	18.01
Résiduelle	36	16.34	0.45	1.16 ^{ns}	16.02
Erreur pondérée	168	5.50	0.33	---	
Totale	269	213.99	---	---	

ns, *, ** = effet non significatif et significatif au seuil de 5 et 1% respectivement

Tableau II.4. Analyse de la variance combinée, régression conjointe et AMMI de l'interaction génotype x campagne du rendement en grain des 15 génotypes du blé dur évalués au cours de 6 campagnes consécutives (1978-2003) sous conditions semi-arides.

Les résultats de la régression conjointe indiquent que la composante linéaire de l'interaction explique seulement 12.76 % de la SCE de l'interaction, le reste de la variation, soit 87.24 %, est cumulée dans la déviation de la régression. La composante linéaire testée par rapport à la déviation de la régression n'est pas significative. Par contre la déviation de la régression testée par rapport à la résiduelle pondérée est hautement significative (Tab.II.4).

La non signification de la composante linéaire suggère l'homogénéité des coefficients de régression des différents génotypes évalués. La déviation de la régression, hautement significative, indique que la régression conjointe est inapte à expliquer l'interaction présente dans les données de cette étude. Cette technique n'arrive pas à décerner entre le comportement génotypique d'origine génétique et l'effet du bruit de fond (ou erreur) de l'expérience, comme le mentionnent Zobel *et al.* (1988).

En effet, les résultats du test t des coefficients de régression des différents génotypes confirment l'homogénéité des « b » qui ne sont pas significativement différents de l'unité (Tab.II.5). L'analyse des résultats montre aussi que les génotypes Cyprus₁ et Deraa contribuent le plus et de manière significative à l'interaction. Ces deux variétés, en plus de Mrb₅, présentent aussi des valeurs de la variance de déviation de la régression (S²_{dj}) significatives (Tab.II.5). Ces trois génotypes sont donc classés comme instables, d'après la définition d' Eberhart et Russell (1966). Les autres génotypes sont considérés comme stables, et parmi lesquels la variété HMO présente la meilleure moyenne du rendement sur toutes les campagnes testées.

II.2.1.2.2. L'analyse AMMI

La première composante de l'analyse AMMI₂ explique 65.97 % de la SCE de l'interaction, avec seulement 18/70 = 25.7 % des degrés de liberté de l'interaction. La seconde composante, avec 16/70 = 22.9 % des degrés de liberté, explique 18.01% de la SCE de l'interaction, et la résiduelle est faite de 16.02 % de la SCE de l'interaction qui reste inexpliquée. Les deux composantes de l'analyse AMMI₂, expliquent près de 84 % de la SCE de l'interaction. Comparativement aux 12.76 % de la SCE de l'interaction expliqués par la

régression conjointe, ces résultats indiquent que l'analyse AMMI₂ est plus adaptée à traiter les données de cette expérimentation où elle explique 84 % de l'interaction (Tableau II.5).

Tableau II. 5. Effet moyen génotype (Y_i), coefficient de régressions (b), écart type du b (ET_b), contribution à la moyenne des carrés des écarts de l'interaction ($MCE_{G \times E}$), et composante résiduelle de la régression (S^2_{di}) du rendement en grain des 15 génotypes du blé dur évalués au cours de 6 campagnes consécutives sous conditions semi-arides.

N°Géno	Géno	Y_i	B	ET_b	$MCE_{G \times E}$	S^2_{di}
1	Ads	2.79	1.625	0.29	0.28	0.16
6	Belikh ₂	2.68	0.609	0.178	0.11	0.06
15	Beliouni	2.58	1.009	0.449	0.32	0.39
8	Bicre	2.64	0.812	0.483	0.38	0.46
4	Cyprus1	3.19	1.276	0.799	1.03**	1.25**
10	Daki	2.68	0.974	0.436	0.3	0.37
9	Deraa	2.93	1.576	0.941	1.51**	1.73**
12	Heider	2.98	0.893	0.333	0.18	0.22
11	Hmo	3.09	1.334	0.557	0.53	0.61
2	Massara ₁	2.52	0.384	0.463	0.48	0.42
13	Mbb	2.42	0.928	0.462	0.34	0.42
7	Mr ₁₆ /Ente/Mari	2.82	0.865	0.219	0.08	0.09
3	Mr ₅	2.89	0.792	0.6	0.58	0.7*
14	Simeto	2.19	0.388	0.38	0.37	0.28
5	Waha	2.89	1.535	0.356	0.31	0.25

*,** variance testées relativement à la résiduelle pondérée, sont significatives au seuil de 5 et 1% respectivement.

L'axe (Y_i) représentant les effets principaux campagnes et génotypes et l'axe (IPCA₁) représentant l'interaction, subdivisent le plan du biplot en quatre quadrants. Les quadrants I et II représentent les génotypes et les campagnes dont le potentiel de rendement est faible, alors que les quadrants III et IV représentent les génotypes et les campagnes dont le potentiel est élevé. Ainsi, Les campagnes E (2001/02) et F (2002/03) ont un potentiel de rendement faible, par contre les campagnes D (1999/00) et C (1998/99) ont, au contraire un potentiel élevé (Fig. II.2). De même, MBB et Massara₁ ont un potentiel de rendement faible, alors que Heider/Martes//Huevos de Oro et Cyprus₁ présentent des potentiels élevés.

représentée par la première composante (IPCA₁). (A, B, C, D, E et F = sont les campagnes de récolte 98, 99, 00, 01, 02 et 03, respectivement dans cet ordre. Décodage des génotypes : Ads = Adamilo/Duillio// Simeto, Bkh₂ = Belikh, Bic = Bicre, Beli = Belouni, Cyp = Cyprus, Der = Deraa ; Dak = Daki, HMO = Heider/Martes/Huevos de Oro, Hei = Heider, Mas = Massara, Mrb₁₆ = Mrb16/Ente//Mario, Mbb = Mohammed Ben Bachir, Sem = Simeto, Wah = Waha).

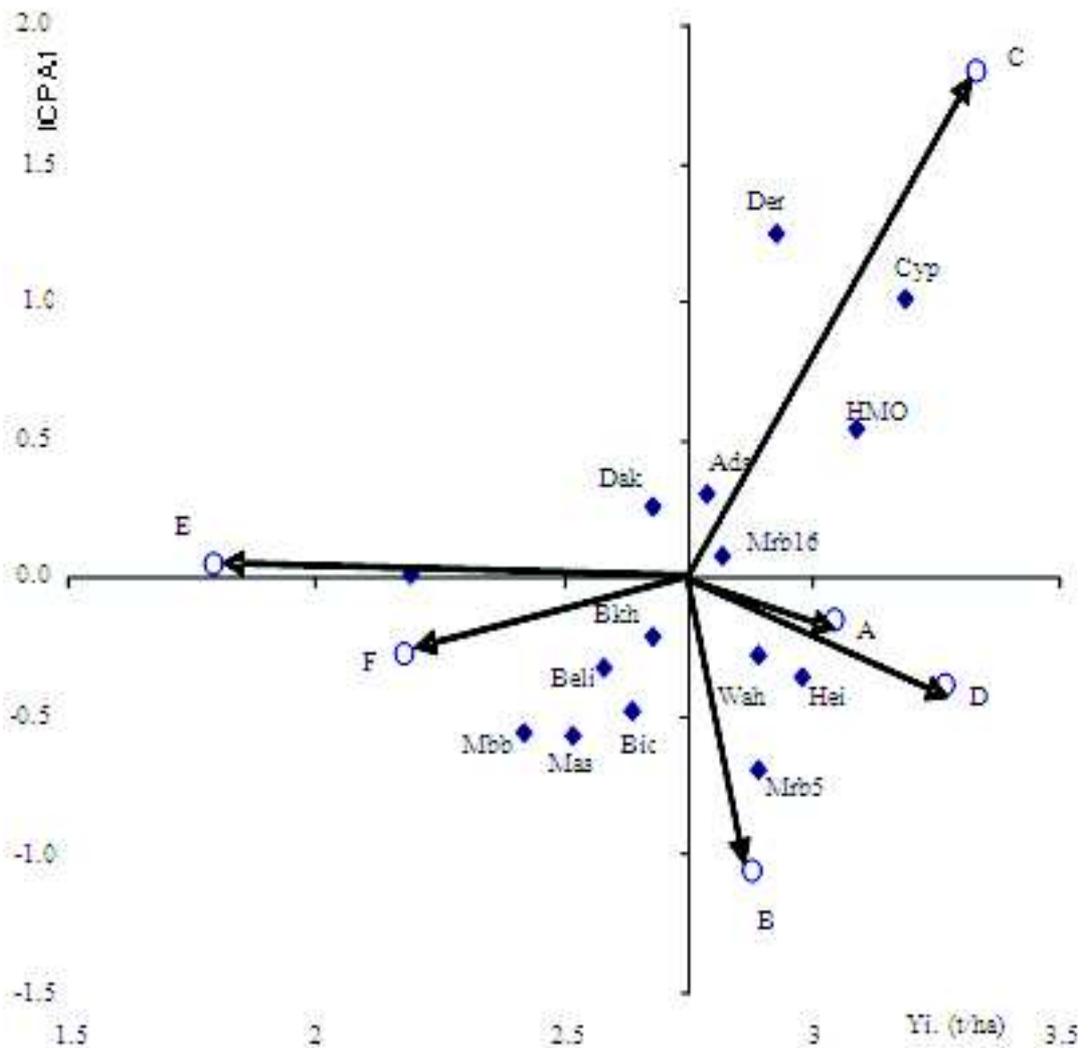


Figure II.2. AMMI₁ biplot des effets principaux génotype, campagne et de l'interaction

Pour un même potentiel de rendement, la dispersion des points le long de l'axe IPCA₁ représente la dimension de l'interaction. Ainsi, les campagnes E, F et A, ont une faible source d'interaction génotype x campagne, suite à leur position proche de l'origine O des scores de l'axe IPCA₁. Il en est de même des génotypes Daki, Belikh₂, A/D//S et Mrb₁₆/Ente//Mario, qui présentent une faible interaction (Figure II.2). Par contre, les campagnes B (1998/99) et C (1999/00) ainsi que les génotypes Cyprus₁, Deraa et Mrb₅ ont une importante source d'interaction, c'est-à-dire qu'ils contribuent le plus à l'interaction (Fig.II.2).

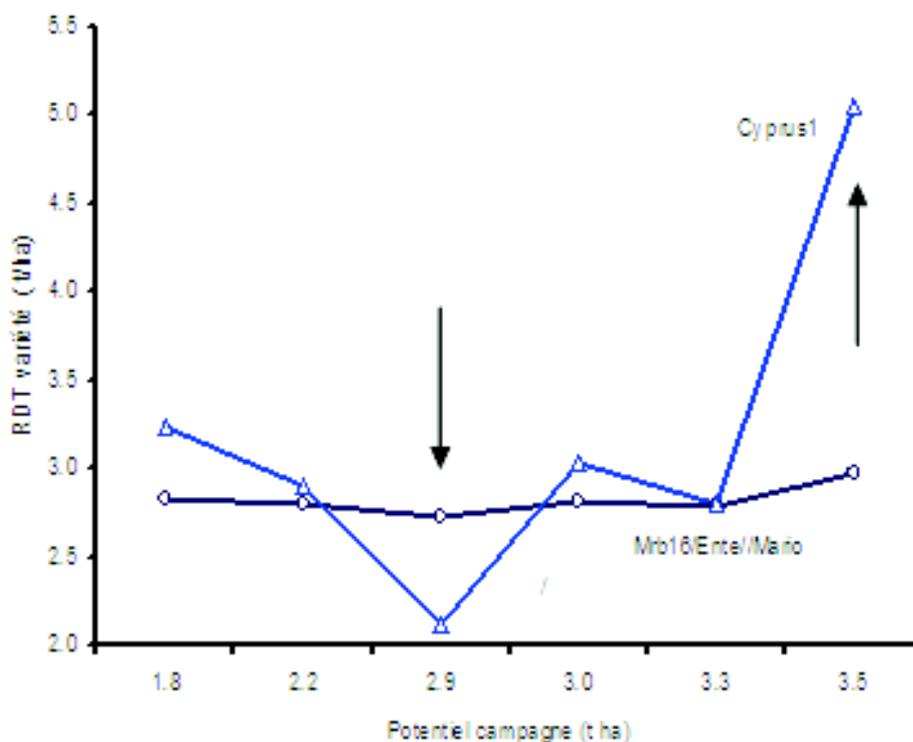
Les génotypes MBB, Massara₁, Beliouni₃₂₅₈ et Bicre se sont mieux exprimés au cours des campagnes E et F. Les génotypes Waha, Mrb₅ et Heider, se sont mieux exprimés au cours des campagnes B et D et à degré moindre lors de la campagne A. Par contre les génotypes Cyprus₁, Heider/Martes/Huevos de Oro et Deraa se sont mieux exprimés au cours de la campagne C (Fig. II.2). MBB et Massara₁ présentent une interaction positive au cours des campagnes E et F, et une interaction négative au cours de la campagne C. L'inverse est noté pour les génotypes Cyprus₁, Deraa et Heider/Martes//Huevos de Oro qui présentent une interaction positive au cours de la campagne C et négative au cours

des autres campagnes (Fig.II.2). Le biplot AMMI₁ décrit relativement bien la complexité de l'interaction qui est associée aux comportements des 15 génotypes évalués au cours des 6 campagnes.

La distribution sur le biplot des campagnes donne une information de leur degré de similitude. Ainsi les campagnes A, B et D sont plus similaires entre elles, ainsi que les campagnes E et F, qui diffèrent fortement de la campagne C. Ceci est basé sur le classement des génotypes évalués, donc sur la base du signe de l'interaction. D'un point de vue sélection, il s'avère difficile d'identifier un génotype largement adapté à toutes les campagnes et possédant, en plus, un rendement élevé. Sur les 6 campagnes, le génotype le plus stable est Mrb₁₆/Ente//Mario, qui se distingue aussi par un rendement moyen supérieur à la moyenne générale des 6 campagnes.

Le génotype le plus performant, en moyenne des 6 campagnes, mais dont le comportement est très irrégulier, est Cyprus₁ (Fig.II.2). Le comportement prédictif, estimé par le modèle AMMI, pour ces deux génotypes, est indiqué en Figure II.3. On note la très grande variation des rendements de Cyprus₁, notamment lors de la 3^{ème} et la 6^{ème} campagne, relativement à Mrb₁₆/Ente//Mario.

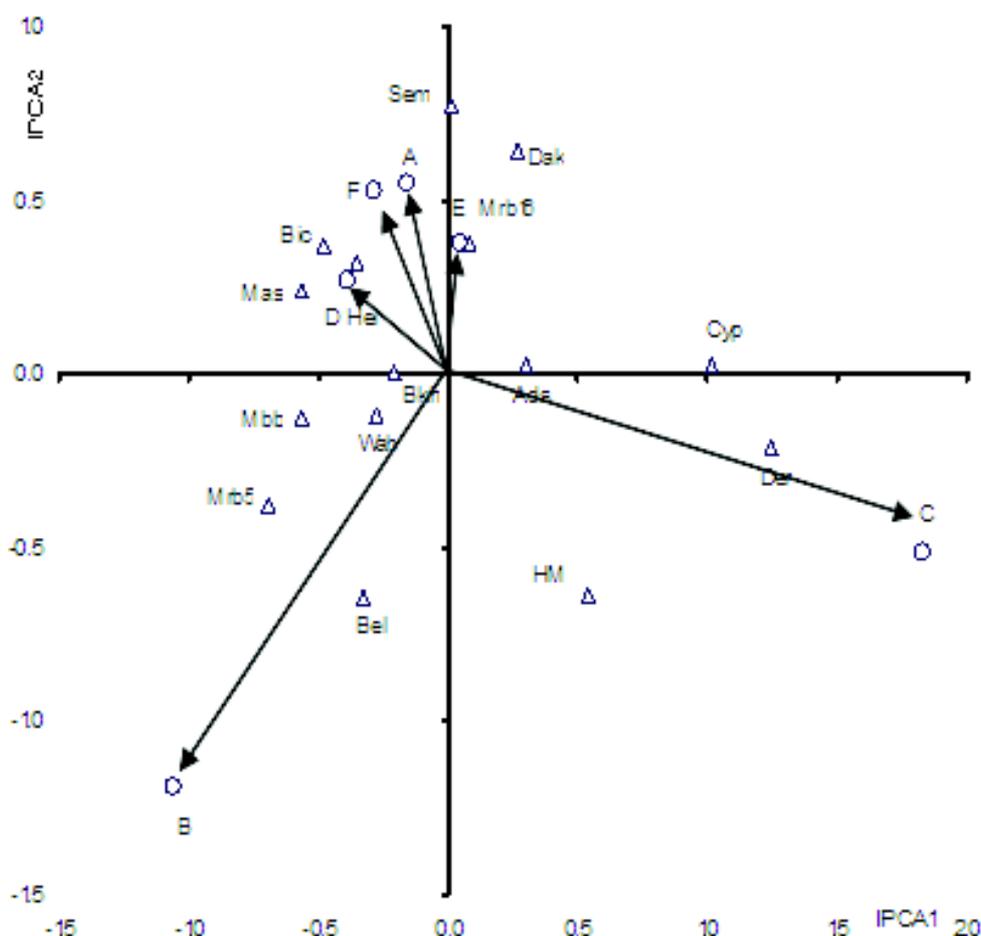
Le biplot AMMI₂ est utilisé pour avoir l'information sur l'adaptabilité et la stabilité des génotypes évalués sur l'ensemble des campagnes. Selon Samonte *et al.*, (2008), plus les valeurs des composantes IPCA₁ et IPCA₂ d'un génotype sont élevées, en valeur absolue, plus ce génotype est caractérisé par une adaptation spécifique à l'environnement près duquel il est positionné. Lorsque ces valeurs sont proches de zéro, origine des deux axes, le génotype en question est stable et mieux adapté à l'ensemble des environnements testés. Des scores, de même signe pour le génotype et l'environnement, indiquent que le génotype présente une interaction positive dans cet environnement où il extériorise un rendement élevé.



Mrb16/Ente/Mario et instable Cyprus₁, sur les 6 campagnes ($RDT_{G_i} = \text{effet principal}_{G_i} + (\text{score}_{G_i} \times \text{Score}_{C_j})$).

Figure II.3. Comportement prévisionnel par le modèle AMMI des géotypes stable

Ainsi Daki, Mrb16/Ente//Mario, A/D//S et Cyprus₁ présentent une interaction positive au cours de la campagne E, à l'opposé de Mrb₅, Belioni, MBB et Waha qui présentent une interaction positive au cours de la campagne B (Figure II.4). D'un point de vue adaptabilité, Belikh₂, A/D//S, Waha, Mrb₁₆/Ente//Mario, Heider, Bicre, Massara₁ et MBB, montrent une adaptabilité relativement plus large que les autres géotypes qui sont plutôt instables (Figure II.4). Parmi ces géotypes, Heider est celui qui a une moyenne de rendement, durant les 6 campagnes, la plus élevée (Tableau II.2).



1 et $IPCA_2$). (A, B, C, D, E et F = sont les campagnes de récolte 98, 99, 00, 01, 02 et 03, respectivement l'ordre. Décodage des génotypes : Ads = A/D//S, Bkh = Belikh₂, Bic = Bicra, Bel = Beliouni, Cyp = Cyprus, Deraa ; Dak = Dakki, HMO = Heider/Martes/Huevos de Oro, Hei = Heider, Mas = Massara, Mrb₁ = Ente/Mario, MBB = Mohammed Ben Bachir, Sem = Simeto, Wah = Waha).

Figure II.4. AMMI₂ biplot de l'interaction représentée par les deux premières composantes

Le biplot AMMI₂ indique aussi que les campagnes C et B sont celles qui contribuent le plus à l'interaction et de manière différente, puisque chaque campagne favorise un comportement variétal différent. Une meilleure expression est réalisée, surtout, par les génotypes Deraa et Cyprus₁ au cours de la campagne C et les génotypes Mrb₅ et Beliouni au cours de la campagne B.

Comparativement, les campagnes A, D, E et F sont une source d'interaction relativement moins importante, mais différent des autres environnements d'un point de vue classement des génotypes. Les résultats de l'analyse de l'AMMI₂ montrent l'importante variabilité climatique des campagnes de production sur les hautes plaines ainsi que l'interaction qu'expriment les génotypes sélectionnés actuellement. La variation climatique d'une année à l'autre est certes difficilement prévisible, mais il semble nécessaire de classer les campagnes pour identifier celles qui sont similaires, et pour lesquelles la sélection est à privilégier.

III.2.1.3. Similitudes des campagnes et du comportement génotypique

La classification des campagnes étudiées sur la base de l'interaction G x C du rendement en grain des 15 génotypes évalués, groupe les six campagnes en trois clusters non similaires. Ces clusters sont représentés par les campagnes 2001/02 (E) et 2002/03 (F) qui forment le cluster C₁ (cluster campagne), les trois campagnes 1997/98 (A), 1998/99 (B) et 2000/01 (D) forment le cluster C₂ et la campagne 1999/00 (C) forme un cluster à part, le cluster C₃ (Figure II.5).

La classification des génotypes identifie également trois clusters non similaires. Le cluster G₁ (cluster génotypes) est formé par les génotypes Waha, Mrb16/Ente//Mario, Deraa et Beliouni, le cluster G₂ comporte les génotypes Massara₁, Mrb₅, Cyprus₁, Bicre, Daki, Heider/Martes//Huevos de Oro et Mohammed Ben Bachir. Le cluster G₃ comporte A//S, Belikh₂, Heider et Sémito (Figure II.5).

L'analyse du rendement en grain des différents clusters de génotypes, dans les différents clusters d'environnements, montre des comportements très contrastés (Figure II.6). En effet, dans les C₁ et C₂, les différences de rendement entre les différents clusters de génotypes sont moins marquées, comparativement au C₃. On note cependant, des similitudes de performances entre G₂ et G₃ en C₁, alors que les génotypes du G₁ se montrent moins performants au cours de ces campagnes.

Par contre, c'est la situation inverse qui se présente au cours des campagnes du C₂, où peu de différences de performances apparaissent entre les génotypes G₁ et G₂ alors que le génotype G₃ montra des performances moins importantes. Au cours de la campagne C₃, les différences de performances entre les trois clusters des génotypes sont plus évidentes et surtout pour les génotypes du G₁ qui montrent les meilleures performances (Fig.II.6).

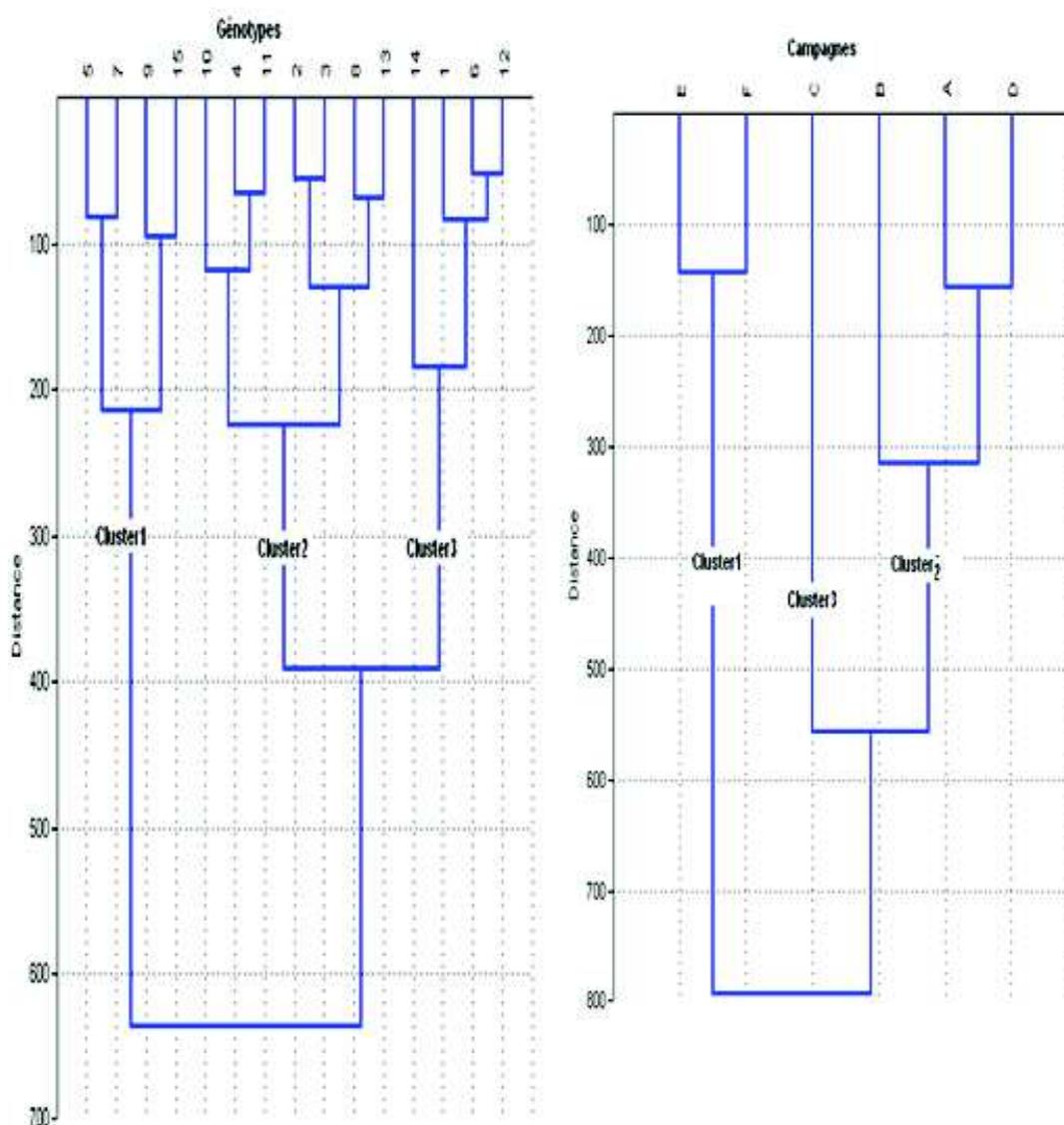


Figure II.5. Groupes de campagnes et de génotypes aux comportements similaires pour le rendement grain

Le groupage des campagnes et des génotypes montre des comportements génotypiques différents et des campagnes différentes. Ce groupage est intéressant, lorsqu'il réduit l'interaction génotype x environnement à l'intérieur des groupes de campagnes. L'analyse de la variance, faite par cluster de campagnes montre que le groupage réduit effectivement de l'interaction génotype x environnement, sans toutefois que l'effet génotype, testé relativement à la variance de l'interaction, ne soit significatif (Tab.II.6).

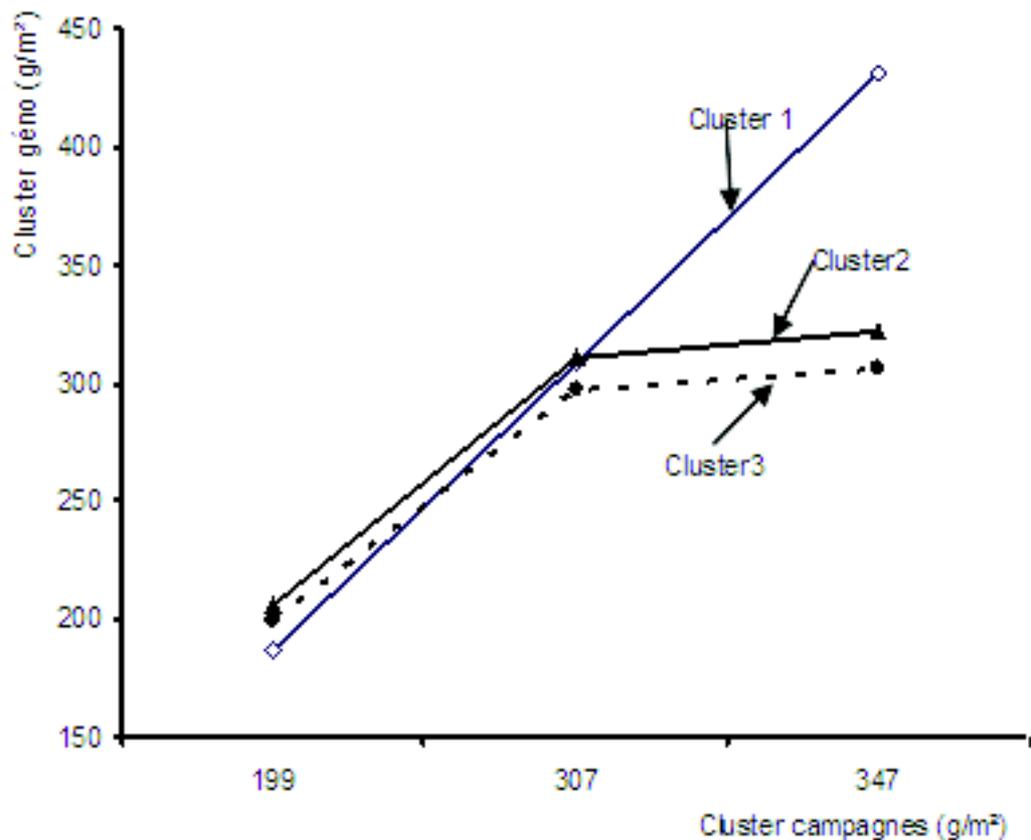


Figure II.6. Performances du rendement en grain des groupes de génotypes dans les différents groupes d'environnements.

Ainsi, Il s'avère donc difficile d'identifier le génotype qui soit relativement performant sur l'ensemble des campagnes testées. Le C₂ représente 50 % des campagnes étudiées, il a un poids déterminant dans le comportement variétal. Ceci suggère de sélectionner le génotype le plus performant et stable dans cet ensemble de campagnes, tout en tenant compte du comportement de ce génotype dans les autres groupes de campagnes. Les meilleurs génotypes de ce groupe de campagnes sont Waha et Mrb₅ (Tab.II.2). Waha reste parmi les meilleurs génotypes au cours des autres campagnes alors que Mrb₅ se montre moins adaptée, au détriment d'autres génotypes comme Heider/Martes//Huevos de Oro, Cyprus₁ et Deraa (Fig. II.6).

Tableau II. 6. Moyennes des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grain, faite par groupe de campagnes (ABD et EF) et pour l'ensemble des 6 campagnes (ABCDEF).

Campagnes	ABCDEF	ABCDEF	ABD	ABD	EF	EF
Source	Ddl	MCE	Ddl	MCE	Ddl	MCE
Camp	5	191115 ^{**}	2	17526 ^{**}	1	32871 ^{**}
Bloc/camp	12	930	6	1361	4	614
Génotype	14	15000 ^{ns}	14	12012 ^{ns}	14	4189 ^{ns}
G x C	70	15223 ^{**}	28	9592 ^{**}	14	2097 ^{**}
Erreur	168	327	84	457	56	157

ABCDEF = sont respectivement les campagnes 97/98, 98/99, 99/00, 00/01, 01/02 et 02/03.

Le site, de la station expérimentale ITGC de Sétif, représente la zone des hautes plaines de l'Est algérien. Ce site se caractérise par une importante variabilité climatique interannuelle. Le processus de sélection appliqué, par cette station, est une répétition des essais de comportement sur trois campagnes agricoles. Au terme de ces trois campagnes, une synthèse est faite pour identifier les meilleurs génotypes, relativement à un témoin de référence qui est le cultivar Mohammed Ben Bachir (MBB). Ce processus se trouve confronté à la réaction différentielle des génotypes à la variabilité climatique interannuelle du milieu de sélection. Cette réaction différentielle des génotypes est connue sous le terme d'interaction génotype x environnement (GxE). Elle noie les contours de l'effet principal génotype, compliquant l'identification du meilleur génotype.

Ce chapitre se fixe pour objectif d'étudier la variabilité des rendements, d'analyser l'interaction GxE à laquelle est soumise la sélection du blé dur et aussi de sélectionner les génotypes les plus adaptés et à haut rendement. Le rendement en grain est utilisé comme variable dépendante du milieu. L'effet de ce dernier, lors de sa variation, agit comme facteur limitant sur un ou plusieurs des caractères qui sont plus ou moins liés à l'expression du rendement, causant ainsi une variation du rendement suite à la réaction (interaction) du génotype avec son milieu. Le rendement, caractère mesurable, devient donc un indicateur de la tolérance vis-à-vis de la variation des conditions de croissance du milieu, à laquelle est soumis le génotype.

Plusieurs méthodes statistiques ont été développées pour analyser l'interaction et aident à identifier les génotypes tolérants et plus adaptés (Lin *et al.*, 1986 ; Gauch, 2006 ; Singh *et al.*, 2006 ; Yan *et al.*, 2008). Ces méthodes se basent sur le principe que la valeur d'un génotype ne dépend pas seulement de son potentiel génétique mais également de sa capacité à maintenir ses performances sous différentes conditions agro-climatiques (Vargas *et al.*, 1999 ; Sabaghnia *et al.*, 2006). Ainsi la sélection du génotype, dont le rendement intersites ou inter-campagnes est stable, est une sélection pour la tolérance et l'adaptation.

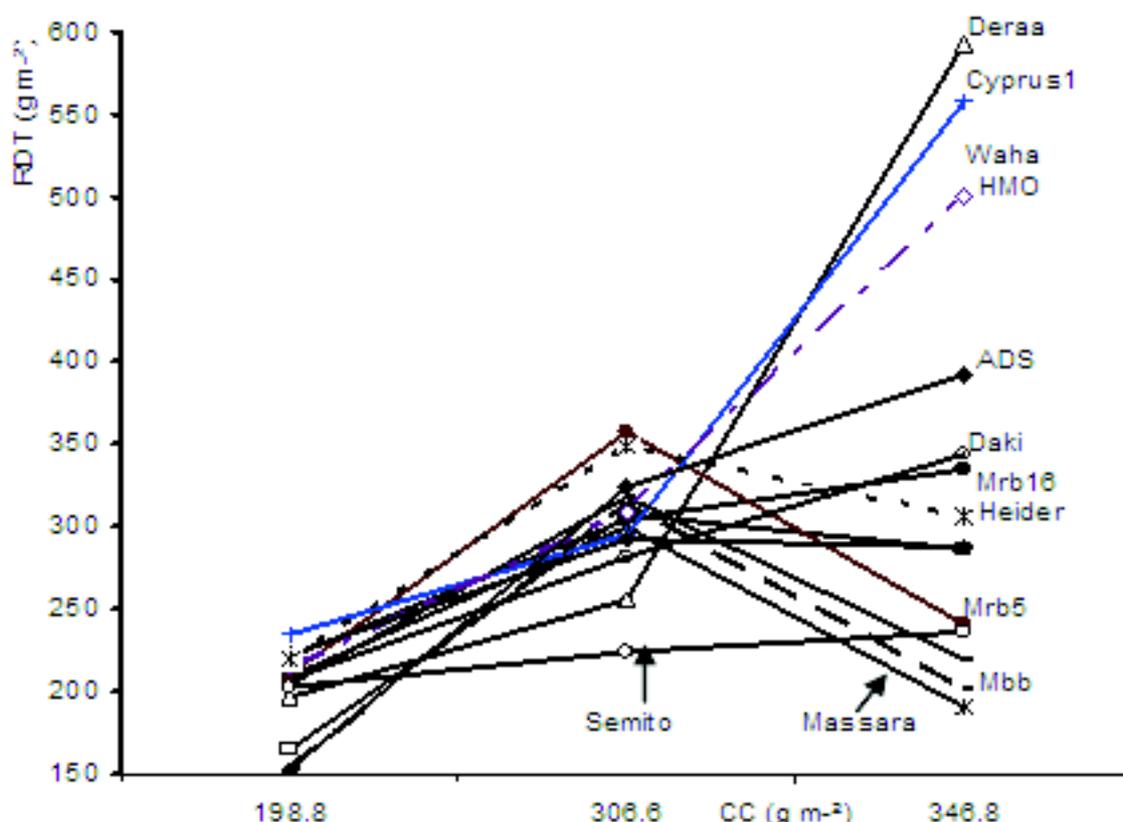


Figure II.7. Performances du rendement en grain des géotypes dans les différents groupes de campagnes.

La stabilité est une caractéristique indicatrice de la variation du rendement d'un géotype donné. Elle est de type statique (Becker et Léon, 1988). Ce type de stabilité est peu intéressant pour le sélectionneur qui cherche à améliorer en même temps la régularité et le potentiel du rendement. La stabilité agronomique ou dynamique est préférable, car elle remplit les conditions de régularité et de performance du rendement (Lin *et al.*, 1986).

Les résultats de la présente étude montrent l'existence de la variabilité génétique par campagne. Ceci est la base de l'applicabilité du processus de sélection. En effet sans les différences d'expressions génotypiques ou effet géotype, la sélection ne peut être conduite. La comparaison des résultats, entre campagnes agricoles successives, indique, cependant, que l'ordre de classement, des géotypes évalués, change d'une campagne à l'autre. Ceci remet en question la répétition des essais sur plusieurs campagnes.

En effet, lorsque l'ordre de classement des géotypes change d'une campagne à l'autre, la moyenne de toutes les campagnes n'est pas valide pour identifier le meilleur géotype, parce que les campagnes ne sont pas similaires (Navabi *et al.*, 2006). L'analyse de la variance combinée des 6 campagnes confirme la présence d'une interaction hautement significative.

Cette analyse indique aussi que l'effet principal année explique 42.43 % de la somme des carrés des écarts des traitements. L'effet principal géotype n'explique que 8.41 % et l'interaction absorbe les 50.00 % restants de la somme des carrés des écarts. Ceci montre l'importante variation climatique du milieu de sélection et aussi la très grande sensibilité des géotypes évalués selon la variation climatique des différentes campagnes sur le site expérimental de l'ITGC de Sétif. Ces résultats corroborent ceux de Brancourt-Hulmel *et al.*,

(2005) qui rapportent que l'effet année est le plus important puisqu'il représente jusqu'à 80% de la variation totale et que l'effet principal génotype et l'interaction ne représentent que 10 à 25%.

Les résultats de l'analyse de la variance combinée suggèrent que le modèle additif n'est pas adapté pour traiter ces résultats, comme le mentionnent Samonte *et al.*, (2005). Il faut, soit, recourir à des modèles linéaires ou multiplicatifs comme le suggèrent Zobel *et al.*, (1988) et De Lacy *et al.*, (1996) ; soit utiliser les méthodes non paramétriques comme le suggèrent Yau et Hamblin (1994) et Sabaghnia *et al.*, (2006). En effet, la présence d'une interaction significative signifie que la sélection est à faire par campagne ou bien par groupe de campagnes similaires où l'interaction est non significative, comme le font remarquer Cornelius *et al.*, (1992).

L'emploi du modèle linéaire est simple (Finlay et Wilkinson, 1963), en plus du fait que ce modèle permet d'analyser la réactivité des génotypes à la variation climatique des campagnes (Brancourt-Hulmel *et al.* 2003). Il permet de décrire les génotypes en fonction de leur aptitude à valoriser les potentialités des milieux. Il classe les différents génotypes selon leur réponse à la variation de la fertilité du milieu :

- Les génotypes qui sont aptes à faire une bonne utilisation des milieux à faibles inputs.
- les génotypes à large adaptation et qui sont aptes à faire une bonne utilisation des potentialités de tous les milieux possibles, dits aussi génotypes passe partout.
- Et enfin, les génotypes qui ne valorisent que les milieux fertiles.

L'application de la régression conjointe indique que la composante linéaire de l'interaction explique seulement 12.76 %, de la SCE de l'interaction, le reste de la variation, soit 87.24 %, est absorbé par la déviation de la régression. La composante linéaire n'est pas significative, indiquant que les coefficients de régression des différents génotypes ne sont statistiquement différents de l'unité. Par conséquent, tous les génotypes montrent une adaptation générale à l'ensemble des campagnes. Ceci va à l'encontre des résultats de l'analyse de la variance combinée. En fait, c'est la taille de la résiduelle de la régression qui a généré ce phénomène. Un modèle dont la résiduelle est importante et significative, n'est pas, non plus, adapté aux données analysées.

La régression conjointe n'arrive pas, dans le cas présent, à décomposer de manière significative la part de l'interaction qui est d'origine génotypique et de celle qui est due au bruit de fond (ou erreur). Brancourt-Hulmel *et al.*, (2005) ainsi que Kadi *et al.*, (2010), rapportent que la régression conjointe n'explique qu'une faible part de l'interaction, moins de 15 %, laissant une grande partie inexpliquée, sous forme de résiduelle de la régression.

L'information tirée des variances de l'interaction et la résiduelle de la régression (S^2_{di}) indique l'instabilité, d'après la définition d' Eberhart et Russell (1966), des génotypes Cyprus₁, et Deraa, qui contribue fortement à l'interaction et de Mrb₅, dont les valeurs deviennent significativement de part et d'autre de la régression. Comparativement aux 12.76 % de la somme des carrés des écarts de l'interaction qui sont expliqués par la régression conjointe, le modèle AMMI explique 84.00 %, avec seulement les deux premières composantes. Ce modèle arrive à expliquer une plus grande partie de l'interaction, sous forme de composantes multiplicatives. Ces résultats corroborent ceux rapportés par Dodig *et al.*, (2008) et Kadi *et al.*, (2010) qui mentionnent que plus de 60 % de l'interaction étaient expliqués par le modèle AMMI.

Les résultats de la présente étude indiquent que le modèle AMMI₂ est plus efficace en terme de décomposition de l'interaction. Il décrit relativement bien la complexité de

l'interaction qui est associée aux comportements des 15 génotypes évalués au cours des 6 campagnes. La première composante de ce modèle classe les différents génotypes et les campagnes en fonction de leurs performances de rendement et la stabilité.

Ainsi les campagnes 2001/02 et 2002/03 (E et F) se caractérisent par un faible potentiel de rendement, par contre les campagnes 1999/00 et 1998/99 (D et C) se distinguent, au contraire, par un potentiel élevé. MBB et Massara₁ ont un potentiel de rendement faible, alors que Heider/Martes//Huevos de Oro et Cyprus₁ présentent des potentiels élevés. Les campagnes E, F et A, sont une faible source d'interaction, ainsi que les génotypes Daki, Belikh₂, Adamillo/Duillio//Simeto et Mrb₁₆/Ente//Mario. Par contre, les campagnes B et C ainsi que les génotypes Cyprus₁, Deraa et Mrb₅ constituent une importante source d'interaction.

Ce modèle indique aussi les campagnes où chaque génotype s'est mieux exprimé. Ainsi MBB, Massara₁, Beliouni₃₂₅₈ et Bicre se sont mieux exprimés au cours des campagnes E et F. Waha, Mrb₅ et Heider, se sont mieux exprimés au cours des campagnes B et D, alors que Cyprus₁, Heider/Martes//Huevos de Oro et Deraa se sont mieux exprimés au cours de la campagne C. Relativement à la première composante de l'interaction, les campagnes A, B et D semblent être plus similaires entre elles, ainsi que les campagnes E et F. Ces dernières diffèrent fortement de la campagne C. Ceci signifie que ces groupes de campagnes classent différemment les génotypes évalués.

La richesse de l'information, apportée par la première composante de l'interaction (IPCA₁), pour décrire les comportements des génotypes au cours des différentes campagnes, ne facilite pas le travail de sélection. En effet, il apparaît alors difficile d'identifier les génotypes qui cumulent des performances de rendement et d'adaptation à l'ensemble des campagnes testées. Mrb₁₆/Ente//Mario montre une adaptation à l'ensemble des campagnes associées à une performance légèrement supérieure à la moyenne générale des 6 campagnes.

L'ajout de l'information apportée par la deuxième composante de l'interaction (IPCA₂), apporte certes un plus d'éclaircissement en ce qui concerne la stabilité des comportements des différents génotypes, mais, elle complique un peu plus l'interprétation générale des comportements génotypiques. Elle suggère que la stabilité ne va pas de paire avec la performance. La recherche de l'adaptation à toutes les campagnes, a donc un prix à payer qui se matérialise par une baisse significative du potentiel du rendement. L'ajout de cette composante identifie Belikh₂, A/D//S, Waha, Mrb₁₆/Ente// Mario, Heider, Bicre, Massara₁ et MBB comme ayant une large adaptabilité sur les 6 campagnes. Il indique aussi que les campagnes A, D, E et F sont plus similaires et contribuent relativement moins à l'interaction.

Selon Voltas *et al.*, (2005), les composantes multiplicatives du modèle AMMI sont peu liées à des facteurs génotypiques ou environnementaux, qui apportent des explications sur les causes de l'interaction, sous forme sensibilité ou de tolérance à la variation des facteurs environnementaux. Epinat-Le Signor *et al.*, (2001) mentionnent que les causes explicatives de la présence d'une interaction sont dues à la variation de la température, au rayonnement, au stress hydrique et à la date de floraison. L'utilisation de la classification hiérarchique des campagnes et des génotypes, sur la base de la matrice des interactions, identifie trois clusters pour les campagnes et les génotypes. L'analyse de la variance des différents clusters montre une réduction de la variance de l'interaction, mais qui reste significative. La comparaison des rendements des différents clusters de génotypes montre

des différences très marquées dans les différents groupes de campagnes. Ceci suggère l'existence de facteurs limitants très différents qui se sont exprimés lors des différents groupes de campagnes.

L'avantage de cette classification est qu'elle fournisse des informations sur les groupes de campagnes où il faut chercher les facteurs limitant le comportement variétal. En effet, la variation des performances et des classements des génotypes, dans les différentes campagnes, est généralement imputable aux différences de sensibilité des génotypes et aux contraintes du milieu qui perturbent le déroulement normal du cycle de la culture. D'autre part, cette classification ne facilite pas la sélection de génotypes à large adaptation qui tolèrent la variation climatique. Elle semble favoriser, plutôt, la sélection pour des adaptations spécifiques à des groupes ciblés de campagnes agricoles. Le C₂ représente 50 % des campagnes étudiées, il a un poids déterminant dans le comportement variétal. Waha et Mrb₅ sont les meilleurs génotypes dans ce groupe de campagnes. Waha maintient ses performances dans les autres groupes de campagnes, alors que Mrb₅ se montre moins adaptée.

CONCLUSION

De nombreuses études ont été réalisées sur l'analyse de l'interaction GxE pour identifier des génotypes stables et performants sur un grand ensemble de milieux (adaptation générale) ou sur un ensemble plus restreint d'environnements (adaptation spécifique). Plusieurs analyses ont été proposées, chacune a ses avantages et ses limites, parmi celles-ci nous citons : ANOVA, la régression conjointe, le modèle AMMI et le «clustering». Dans cette étude, l'ANOVA combinée à 6 campagnes confirme la présence d'une interaction hautement significative. Elle indique aussi que l'effet principal année explique 42,43 % de la SCE des traitements, l'effet principal génotype n'explique que 8,41 % et l'interaction absorbe les 50% restant de la SCE. Ceci montre l'importante variation climatique de la sélection et aussi la très grande sensibilité des variétés évaluées selon la variation climatique des différentes campagnes au niveau du site de l'ITGC.

Quant à la régression conjointe (modèle linéaire), elle explique seulement 12,76 % de la SCE de l'interaction et le reste de la variation, soit 87,24 %, est absorbé par la déviation de la régression. Concernant le modèle AMMI, il explique 84 % de la SCE de l'interaction avec seulement les deux premières composantes sous forme de composantes multiplicatives. Dans cette étude, le modèle AMMI est plus efficace en terme de décomposition. Il décrit relativement bien la complexité de l'interaction qui est associée aux comportements des 15 génotypes évalués au cours des 6 campagnes.

Quant à la classification hiérarchique « clustering » des campagnes et génotypes, elle nous a permis d'identifier trois groupes « clusters » pour les campagnes et les génotypes. L'avantage de cette classification est qu'elle nous fournisse des informations sur les groupes de campagnes où il faut chercher les facteurs limitant le comportement variétal. Cette classification ne facilite pas la sélection de génotypes à large adaptation qui tolèrent la variation climatique. Elle semble être, plutôt, en faveur de la sélection pour des adaptations spécifiques à des groupes ciblés de campagnes agricoles par exemple le C₂ qui représente 50 % des campagnes étudiées.

Chapitre III. : Etude de la tolérance du blé dur (*T. durum* Desf.) aux stress abiotiques sous conditions semi-arides : Utilisation des indices de la tolérance à la contrainte

Résumé.

L'irrégularité des rendements est due en partie à la sensibilité du matériel végétal sélectionné vis-à-vis des stress abiotiques. Cette sensibilité différentielle engendre des interactions génotype x environnement qui entravent le progrès en sélection et compliquent l'identification et la recommandation des génotypes performants. En présence d'interaction, le sélectionneur doit concilier adaptabilité et potentiel de rendement. Les indices de tolérance utilisés classent différemment les génotypes évalués et forment des groupes divergents. Le premier groupe est formé par les indices P, MP, GMP et STI qui s'opposent aux indices S et YSI. Le second groupe est formé des indices RY et YI qui s'opposent à l'indice HMP. Les indices P, MP, GMP et STI identifient les génotypes associant le potentiel de rendement et à la tolérance des stress. Les génotypes identifiés par ces indices appartiennent aux classes A et B. Les indices S et YSI identifient des génotypes tolérants les stress, et appartenant aux classes C et D. Par contre les indices RY et YI identifient des génotypes du groupe B, performants sous conditions favorables ; alors que l'indice HMP identifie des génotypes de la classe C, performants, surtout, sous conditions de stress hydrique. Pour les besoins de la sélection dans une région semi-aride, les résultats suggèrent d'utiliser l'un des indices P, MP, GMP ou STI, lorsque la sélection est orientée vers la performance et la tolérance des stress. Dans le cas où l'on privilégie la sélection des génotypes tolérants et plus performants sous conditions de stress, il est conseillé d'utiliser l'indice HMP. L'utilisation de ces indices a identifié les génotypes Cyprus₁ et Heider/Martes// Huevos de Oro comme les plus tolérants et performants sur l'ensemble des milieux. Elle a identifié aussi Waha et Adamillo/ Duilio//Simeto comme tolérants et performants uniquement dans les milieux favorables et les génotypes Massara₁ et Belikh₂ comme tolérants et performants dans les milieux non favorables.

Mots clés. *T. durum* – indice – tolérance – potentiel - interaction

Abstract.

The erratic grain yield performance is due in part to the sensitivity of selected plant material to the abiotic stresses. This differential sensitivity generated genotype x environments

that impeded progress in breeding and complicated the identification and recommendation of genotypes. In the presence of interaction, Breeders look for a compromise between adaptability and yield potential. Stress tolerance indices classify differently the evaluated genotypes into divergent groups. The first group consists of the indices P, MP, GMP and STI opposed to the S and YSI. The second group consists of indices RY and YI opposed to the HMP index. P, MP, GMP and STI indices identify genotypes combining high yield potential and stress tolerance. The genotypes identified by these indices belong to classes A and B. The S and YSI indices identify genotypes tolerant to stress, belonging to C and D classes. RY and YI indices identify genotypes of group B, which perform well under favorable conditions, while the HMP index identifies class C genotypes, which perform well, especially under water stress conditions. Selecting in a semi-arid region, the results suggest using one of the following indices P, MP, GMP, or ITS, when selection is targeted towards performance and stress tolerance. When selection is directed toward genotypes tolerant to stresses and high yielding under stressful conditions, it is advisable to use the HMP index. The use of these indices identified Cyprus₁ and Heider/Martes//Huevos de Oro as the most tolerant and high yielding in all environments. Waha and Adamillo/Duilio//Simeto were identified as stress tolerant and high yielding under favorable environments, Massara1 and Belikh2 were classified as stress tolerant and high yielding under less favorable environments.

Keywords. *T. Durum* - index - tolerance - potential - interaction

Introduction

L'irrégularité des rendements est due en partie à la sensibilité du matériel végétal sélectionné vis-à-vis des stress abiotiques (Benmahammed *et al.*, 2005). Cette sensibilité différentielle engendre des interactions génotype x environnement qui entravent le progrès en sélection et compliquent l'identification et la recommandation des génotypes performants (Bouzerzour et Djekoun, 1996).

En présence d'interaction, le sélectionneur doit concilier adaptabilité et le potentiel de rendement (Fellah *et al.*, 2002 ; Adjabi *et al.*, 2007). L'adaptabilité est définie comme étant la capacité d'un génotype à donner un haut rendement sous diverses conditions, aussi bien favorables que contraignantes (Fordyce, 2006). Cette notion est liée à la tolérance des stress. Tardieu (2003) définit la tolérance comme étant la capacité du génotype à minimiser la réduction du rendement sous stress.

Fernandez (1992) a classé la réponse des génotypes à la variation des milieux en quatre groupes, désignés A, B, C et D. Selon cette classification les génotypes du groupe A produisent un haut rendement aussi bien sous conditions favorables que défavorables. Ceux du groupe B donnent un haut rendement sous conditions favorables, alors que ceux du groupe C, au contraire donnent un haut rendement sous conditions contraignantes. Les cultivars du groupe D ont un faible potentiel de rendement quelles que soient les conditions de croissance auxquelles ils sont soumis.

Les génotypes du groupe A sont les plus intéressants, parce qu'ils valorisent l'ensemble des milieux possibles. Ils seraient les mieux indiqués par les régions où la variation climatique inter-annuelle est forte, engendrant des interactions génotype x environnement. Les génotypes des groupes B et C permettent une utilisation positive de l'interaction (Annichiarico *et al.*, 2005). Plusieurs recherches utilisent des indices de mesure de la

tolérance des stress à travers la mesure du rendement pour identifier des génotypes à large adaptation (Fisher et Maurer, 1978 ; Lin et Binns, 1988 ; Pinter *et al.*, 1990 ; Sabaghnia *et al.*, 2006 ; Rose *et al.*, 2008). L'objectif de la présente étude est de comparer l'efficacité de plusieurs indices pour identifier des génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) tolérants et performants.

III.1. Matériel et méthodes

III.1.1. Matériel végétal et indices utilisés

L'analyse porte sur le rendement grain des quinze génotypes de blé dur, qui ont fait l'objet d'étude du précédent chapitre. Plusieurs indices ont été utilisés. Ces indices sont l'indice de la sensibilité à la contrainte hydrique, noté **S**, décrit par Fischer et Maurer (1978). L'indice de la supériorité génotypique, noté **P**, est décrit par Lin et Binns (1988). L'indice de la productivité moyenne, noté **MP** et celui de tolérance, noté **TOL**, sont décrits par Sio-Se Mardeh *et al.*, (2006). L'indice de la tolérance du stress, noté **STI**, et l'indice de la moyenne géométrique de la productivité (**GMP**) sont décrits par Fernandez (1992). L'indice du rendement (**YI**), l'indice de stabilité du rendement (**YSI**) et l'indice de la moyenne harmonique du rendement (**HMP**) sont décrits par Gavuzzi *et al.*, (1997) et par Bouslama et Schapaugh, (1984).

III.1.2. analyse des données

La tolérance au stress est approchée par le calcul l'indice de la sensibilité à la contrainte hydrique de Fischer et Maurer (1978). Cet indice est calculé par :

$$S_i = (1 - Y_i / Y_F) / (1 - Y_s / Y_F),$$

où Y_i = rendement du génotype considéré dans le milieu stressant, Y_F = rendement du même génotype réalisé dans le milieu non stressant, Y_s = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu stressant et Y_F = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu favorable.

L'indice P de Lin et Binns (1988) est calculé comme suit :

$$P = [\sum(Y_{ij} - M_j)]^2 / 2n,$$

où Y_{ij} = rendement du génotype i dans le milieu j , M_j = rendement du génotype le plus performant dans le milieu j , n = nombre de milieux testés.

L'indice de la productivité moyenne (MP) est calculé par :

$$MP = (Y_F + Y_s) / 2,$$

où Y_F = rendement obtenu en l'absence du stress, et Y_s = rendement obtenu sous stress.

L'indice de la tolérance est calculé par :

$$TOL = Y_F - Y_s,$$

L'indice de la tolérance au stress (STI) est calculé par :

$$STI = (Y_F + Y_s) / Y_F,$$

où Y_F = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes dans le milieu favorable.

La moyenne géométrique de la productivité (GMP) est calculée par :

$$GMP = (Y_F \times Y_s)^{0.5},$$

L'indice de rendement (YI) est calculé par :

$$YI = Y_i / Y_s,$$

où Y_s = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes dans le milieu stressé.

L'indice de stabilité du rendement (YSI) a été calculé par :

$$YSI = Y_s / Y_F,$$

La moyenne harmonique du rendement (HMP = Harmonic mean productivity) et le rendement relatif (RY) ont été calculés par :

$$HMP = \frac{2}{(1/Y_s) + (1/Y_F)}$$

et

$$RY = Y_i / Y_{\max}$$

Sio-Se Mardeh *et al.*, (2006) attribuent les indices MP et TOL à Hossein *et al.*, (1990) ; STI et GMP à Fernandez (1992) ; YI à Gavuzzi *et al.*, (1997) et YSI à Bouslama et Schapaugh, (1984).

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. L'indice S

L'indice S mesure la réduction du rendement grain du génotype, en passant du milieu stressant au milieu favorable, relativement à la réduction moyenne observée pour l'ensemble des génotypes testés. Le génotype qui minimise cette réduction est tolérant au stress qui différencie les milieux contraignants et favorables. La différentielle du rendement

grain, entre les milieux contraignants et favorables, est partiellement due à l'effet du stress hydrique.

En effet la différence de pluviométrie entre le milieu stressant et le milieu favorable est de 168.7 mm pour une différence de rendement grain de 1.53 t ha^{-1} . La contrainte hydrique réduit le potentiel de rendement de 46%. S varie de 0.14 à 1.51. Massara₁, Simeto et MBB ont les plus faibles valeurs, comparativement à Deraa, Adamillo/Duilio//Simeto et Heider/Martes//Huevos de Oro qui prennent les valeurs les plus élevées (Tab.III.1). Les géotypes aux faibles valeurs S sont tolérants à la contrainte hydrique.

Tableau III. 1. Indices de tolérance du stress caractéristiques des différents géotypes

Gén.	S	P	MP	TOL	STI	GMP	YI	YSI	HMP	RY
Ads	1.28	3.22	2.77	2.32	1.66	2.51	0.89	0.41	0.44	0.62
Mas	0.14	5.13	1.85	0.13	1.11	1.84	0.99	0.93	0.54	0.68
Mrb ₅	0.7	2.6	2.02	0.78	1.21	1.98	0.91	0.68	0.51	0.63
Cyp	1.16	1.19	4.08	2.94	2.45	3.8	1.44	0.47	0.28	1.00
Wah	1.12	2.61	2.29	1.59	1.37	2.14	0.83	0.48	0.5	0.57
Bkh	0.75	3.89	2.37	0.99	1.43	2.33	1.05	0.66	0.44	0.73
Mrb ₁₆	0.87	3.05	2.68	1.34	1.61	2.59	1.11	0.6	0.4	0.77
Bic	0.58	4.16	1.91	0.59	1.15	1.88	0.9	0.73	0.54	0.62
Der	1.51	2.42	3.86	4.14	2.32	3.26	1	0.3	0.36	0.69
Dak	1.11	3.94	2.57	1.76	1.54	2.41	0.94	0.49	0.44	0.65
HMO	1.32	1.6	3.49	3.03	2.09	3.14	1.09;	0.39	0.35	0.76
Hei	0.72	2.13	2.55	1.02	1.53	2.5	1.14	0.67	0.41	0.79
Mbb	0.59	5.88	1.75	0.55	1.05	1.72	0.82	0.73	0.59	0.57
Sem	0.46	8	2.11	0.49	1.27	2.1	1.04	0.79	0.48	0.72
Bel	1.02	4.64	2.2	1.34	1.32	2.09	0.85	0.53	0.5	0.59

S = indice de la sensibilité à la contrainte, P = indice de la supériorité génotypique, MP = Moyenne des performances, TOL = Tolérance du stress, STI = Indice de tolérance du stress, GMP = moyenne géométrique des performances, YI = indice de rendement, YSI = indice du stress du rendement, HMP = moyenne harmonique des rendements, RY = rendement relatif.

Les valeurs S sont positivement liées au rendement du milieu favorable ($r = 0.8521^{**}$, $P < 0.01$), mais pas à ceux du milieu contraignant. Ce résultat indique que la tolérance à la contrainte est acquise au détriment du potentiel de rendement. A cet effet Rosielle et Hamblin (1981) mentionnent que la sélection de faibles valeurs S réduit du potentiel de rendement dans les environnements favorables. Cet indice dissocie entre la tolérance du stress et le potentiel de rendement (Clarke *et al.*, 1992).

III.2.2. Les indices MP, GMP et STI

Les valeurs élevées de ces indices sont les plus désirables. Les géotypes Cyprus₁, Deraa et Heider/Martes//Huevos de Oro montrent les plus fortes valeurs pour ces indices. Par opposition, les plus faibles valeurs de ces indices sont présentes chez Massara₁, MBB et Bicre (Tab.III.1). Ces indices sont corrélés (coefficient de corrélation de rang de Spearman, valeur désirable = rang 1) entre eux ($r_{MP-STI} = 1.00^{**}$, $r_{MP-GMP} = 0.989^{**}$, $r_{GMP-STI}$

= 0.989**,) et avec P ($r_{MP-P} = 0.746^{**}$, $r_{GMP-P} = 0.764^{**}$, $r_{STI-P} = 0.746^{**}$) et avec le rendement du milieu favorable ($r_{MP-YF} = 0.945^{**}$, $r_{GMP-YF} = 0.950^{**}$, $r_{STI-YF} = 0.975^{**}$).

Ces indices apportent relativement le même type d'informations en ce qui concerne la performance de rendement : Ils identifient des géotypes plus performants dans les milieux favorables, et qui présentent l'avantage de ne pas sous valoriser les milieux contraignants (Fig.III.1).

III.2.3. LES INDICES YSI et TOL

Ces indices sont indicateurs de la minimisation de la perte du rendement entre milieu favorable et milieu contraignant pour un géotype donné. Les valeurs élevées de l'indice YSI et les faibles valeurs de l'indice TOL sont désirables. Ils identifient Massara₁, Bicre, MBB et Simeto comme des géotypes tolérants relativement à Cyprus₁, Deraa et Heider/Martes//Huevos de Oro qui sont sensibles.

En effet, Massara₁, Bicre, MBB et Simeto présentent de faibles valeurs pour l'indice TOL et des valeurs élevées pour l'indice YSI, à l'inverse des géotypes Cyprus₁, Deraa et Heider/Martes//Huevos de Oro (Tab.III.1). Ces indices sont liés entre eux et avec l'indice S ($r_{TOL-SYI} = 0.986^{**}$, $r_{TOL-S} = 0.986^{**}$) et avec le rendement du milieu favorable ($r_{TOL-YF} = -0.956^{**}$, $r_{YSI-YF} = -0.936^{**}$).

Ces indices sont indicateurs de la tolérance au stress qui est négativement corrélée avec le potentiel de rendement. Les valeurs intermédiaires peuvent, cependant, identifier des géotypes moyennement tolérants dont les performances sont en dessous de la moyenne. Les géotypes Heider et Mrb₁₆/Ente /Mario remplissent ces deux conditions (Tab.III.1).

III.2.4. Les indices YI, RY et HMP

Les valeurs élevées des indices YI, RY et HMP sont désirables parce qu'elles indiquent une faible perte de rendement sous stress relativement au rendement moyen de l'ensemble des géotypes évalués dans le milieu contraignant, pour YI et par rapport au géotype dont le rendement est maximal sous stress pour RY.

HMP donne le même poids au rendement obtenu sous stress et sous conditions favorables. RY et YI classent Cyprus₁, Heider, Heider/Martes/Huevos de Oro et Mrb₁₆/Ente/ Mario comme performants et tolérants. Ils classent MBB, Beliouni, Adamillo/Duilio/Simeto et Waha comme peu performants et de ce fait, sont sensibles au stress.

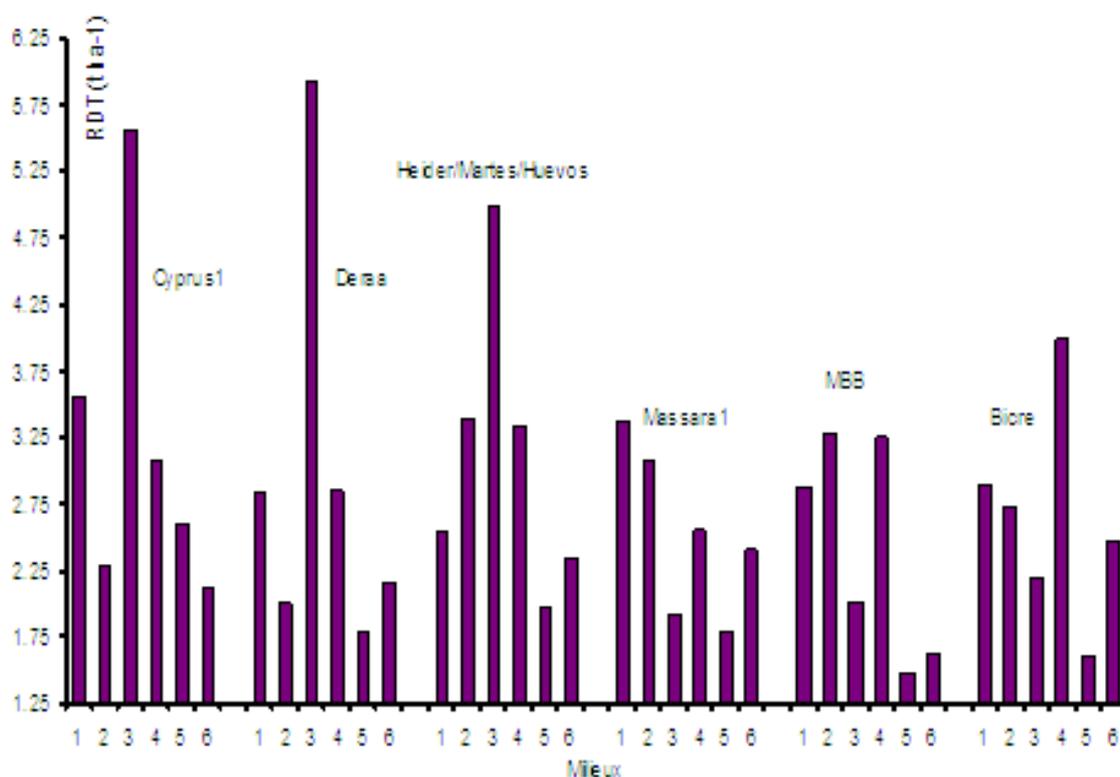


Figure III.1. Variation comparée des performances des génotypes présentant des valeurs élevées (Cyprus₁, Deraa, Heider/Martes/Huevos de Oro) et faibles (Massara₁, MBB, Bicre) pour les indices de la tolérance du stress MP, GMP et STI.

L'indice HMP, au contraire, classe les génotypes Cyprus₁, Heider, Heider/ Martes/ Huevos de Oro et Mrb16/Ente/Mario comme sensibles au stress et identifie Massara₁, Bicre et MBB comme tolérants au stress (Tab.III.1). Cet indice n'intègre pas le potentiel de rendement qui s'exprime sous conditions favorables. Les indices RY et YI présentent des corrélations de rang significatives et positives avec les indices P, STI, GMP et le rendement obtenu sous stress. Ils sont négativement corrélés avec l'indice HMP ($r = - 0.743^{**}$).

III.2.5. Ressemblance des indices de tolérance

La matrice des coefficients de corrélation de rang de Spearman indique des tendances de similitude entre les différents indices étudiés. Les relations existantes entre les différents indices sont étudiées grâce à une analyse en composantes principales réalisée à partir de la matrice des classements des génotypes sur la base des valeurs prises par les indices de tolérances (Fig.III.2). Les deux premières composantes principales expliquent 88.09% (51.43 et 36.65% pour les facteurs 1 et 2) de la variation totale. Le biplot groupe les indices selon le degré de ressemblance en ce qui concerne l'information apporté au sujet de la tolérance vis à vis des stress et le potentiel de rendement grain. L'axe 1 représente la tolérance associée aux performances de rendement en milieux favorables.

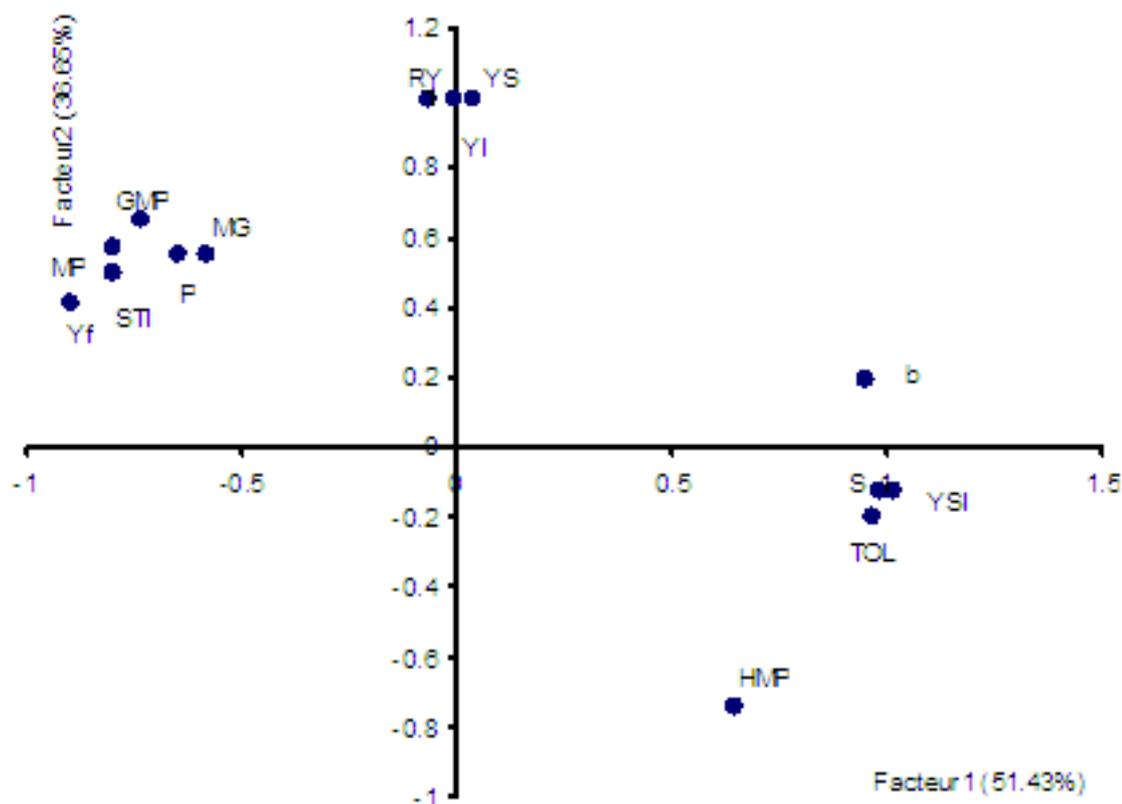


Figure III.2. Similitude des indices mesurant la tolérance vis-à-vis des stress abiotiques

Par contre l'axe 2 représente la tolérance associée à la performance de rendement en milieux stressants (Fig.III.2). Le long de l'axe 1, s'opposent les P, MP, GMP, et STI qui se regroupent ensemble avec les rendements du milieu favorable (YF) et la moyenne des rendements de l'ensemble des milieux (MG) aux indices b, S, YSI et TOL (Fig.III.2). Les indices P, MP, GMP, et STI identifient les génotypes performants et tolérants. La tolérance, dans ce contexte, est synonyme de stabilité agronomique.

Ces indices sont donc aptes à identifier les génotypes de la classe A, qui font des rendements au dessus de la moyenne, quelque soit le milieu. Les indices S, YSI et TOL identifient les génotypes tolérants à la contrainte hydrique. Dans ce contexte, la tolérance est synonyme de minimisation des pertes de rendement en passant des conditions favorables aux conditions contraignantes.

Les génotypes identifiés par ces indices ne valorisent pas les environnements favorables parce qu'ils ont un faible potentiel de rendement. Ils performant le plus souvent mieux sous la contrainte hydrique, et de ce fait, ils sont assimilés au groupe C. Le long de l'axe 2 s'opposent les indices RY et YI qui sont liés au rendement du milieu contraignant (Y_S), à l'indice HMP (Fig.III.2). Ces indices sont indicateurs de la tolérance vis-à-vis de la contrainte hydrique, tolérance liée à la performance sous conditions stressantes (Y_S). Ces indices identifient les génotypes de classes C et D.

III.2.6. Typologie variétale

L'analyse en composantes principales réalisée sur la matrice des classements (rangs) des génotypes sur la base des valeurs des indices indique la similitude des comportements des différents génotypes (Fig.III.3). Ainsi les génotypes Cyprus₁, Heider, Heider/Martes/Huevos de Oro, Deraa et Mrb₁₆/Ente/Mario se comportent de manière similaire vis-à-vis du stress.

L'analyse des courbes de tendance, relativement à la courbe des moyennes de rendement (Fig.III.4) indique que les génotypes Cyprus₁, Heider, Heider/Martes/Huevos de Oro, et Mrb₁₆/Ente/Mario appartiennent à la classe A, donnant des rendements relativement élevés quelque soit le milieu. Parmi ces génotypes, Cyprus₁ et Heider/Martes/Huevos de Oro présentent les meilleurs potentiels de rendement. Deraa, par contre, appartient à la classe B, donnant des rendements élevés uniquement sous conditions favorables (Fig.III.4).

Par opposition à ces variétés sur l'axe 1, les génotypes Beliouni, MBB, Bicre et Mrb₅ présentent la même similitude de réponse à la variation des milieux (Fig.III.3). L'étude des courbes de tendances indique que parmi ces variétés, MBB, Beliouni et Bicre présentent un faible potentiel de rendement, et donnent des rendements inférieurs à la moyenne quelque soit le milieu. Ils appartiennent à la classe D. Par contre Mrb₅ montre une tendance à donner des rendements élevés sous stress

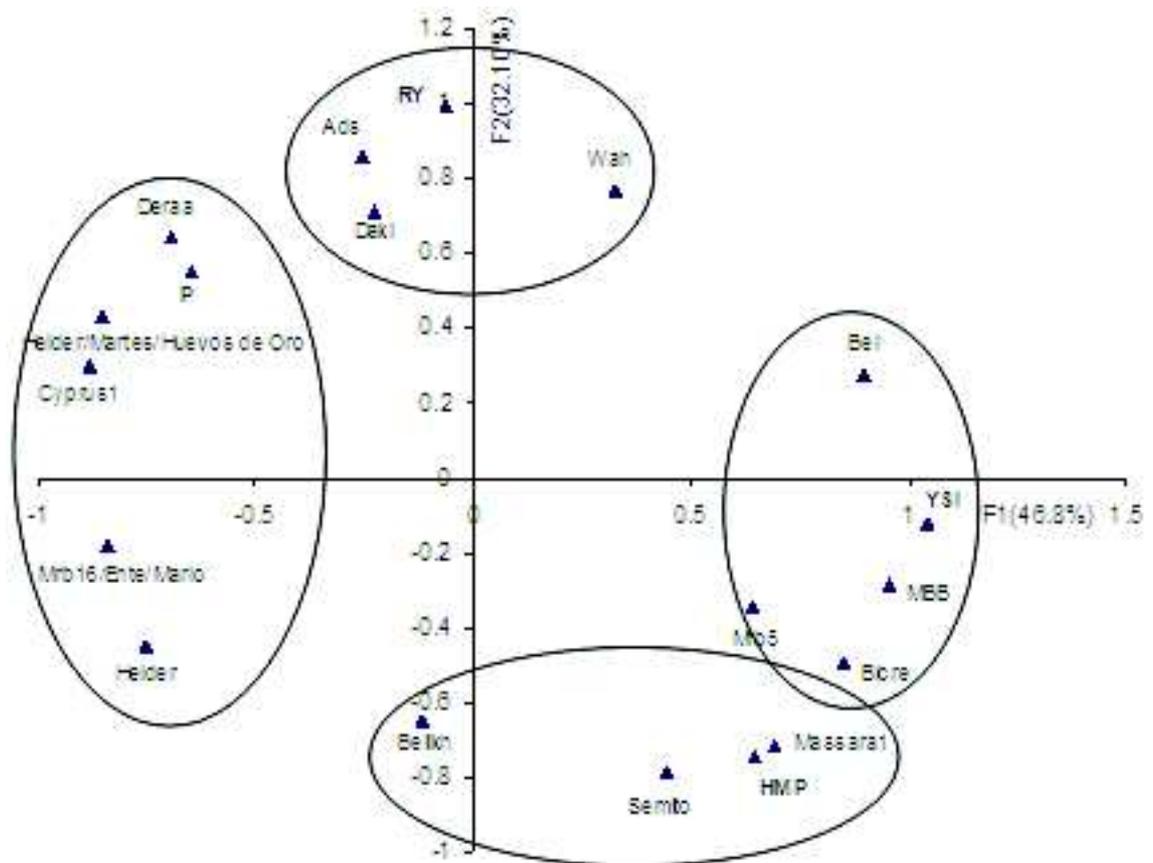


Figure III.3. Classement des variétés étudiées en fonction de la tolérance au stress et du potentiel de rendement grain

Ce génotype appartient à la classe C (Fig.III.5). Le long de l'axe 2, les génotypes Adamillo/Duilio/Simeto, Waha et Daki présentent des comportements similaires. Ils

s'opposent au comportement du groupe formé par les variétés Belikh₂, Massara₁ et Simeto (Fig.III.3).

Waha et Adamillo//Duilio/Simeto appartiennent au groupe B, ils fournissent de hauts rendements uniquement sous conditions favorables. Ces génotypes entrent en compétition avec les génotypes du groupe A, dans les milieux à haute fertilité (Fig.III.6). Parmi ce groupe, Daki appartient au groupe D, il présente un faible potentiel de rendement sur l'ensemble des milieux étudiés. Dans le groupe opposé, Simeto montre un faible potentiel de rendement sur l'ensemble des milieux. Ce génotype appartient au groupe D. Par contre Massara₁ et Belikh₂ donnent un rendement élevé sous stress, ils appartiennent au groupe C (Fig.III.6). Ces deux variétés entrent en concurrence avec les génotypes adaptés spécifiquement aux milieux non favorables.

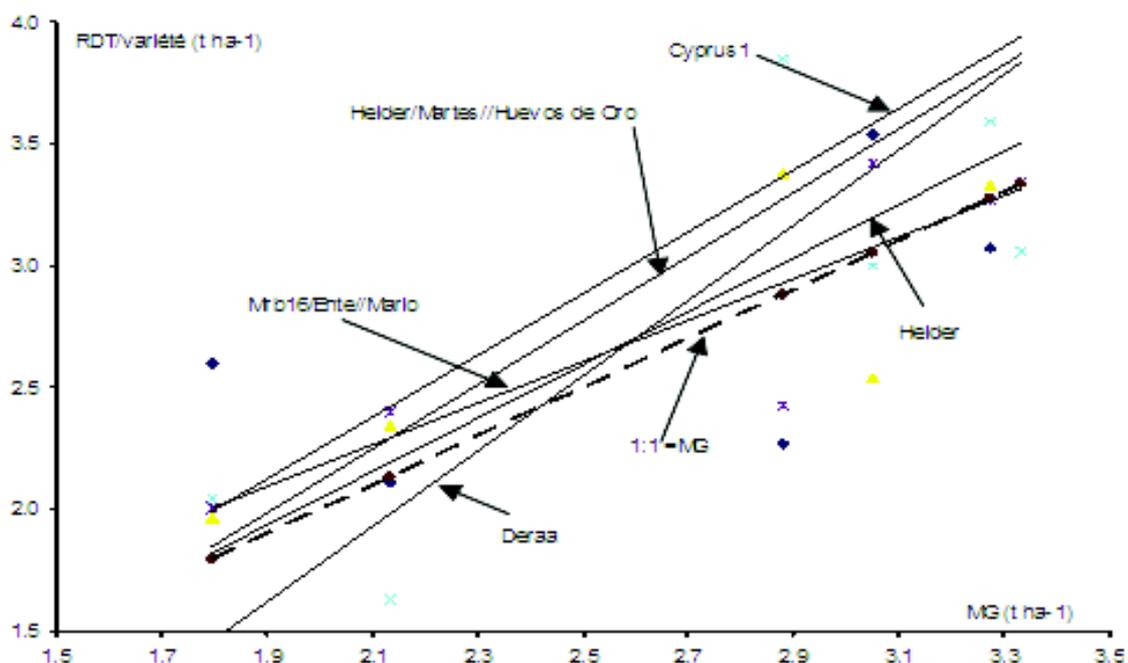


Figure III.4. Tendance des performances des génotypes à haut potentiel de rendement et tolérant les stress.

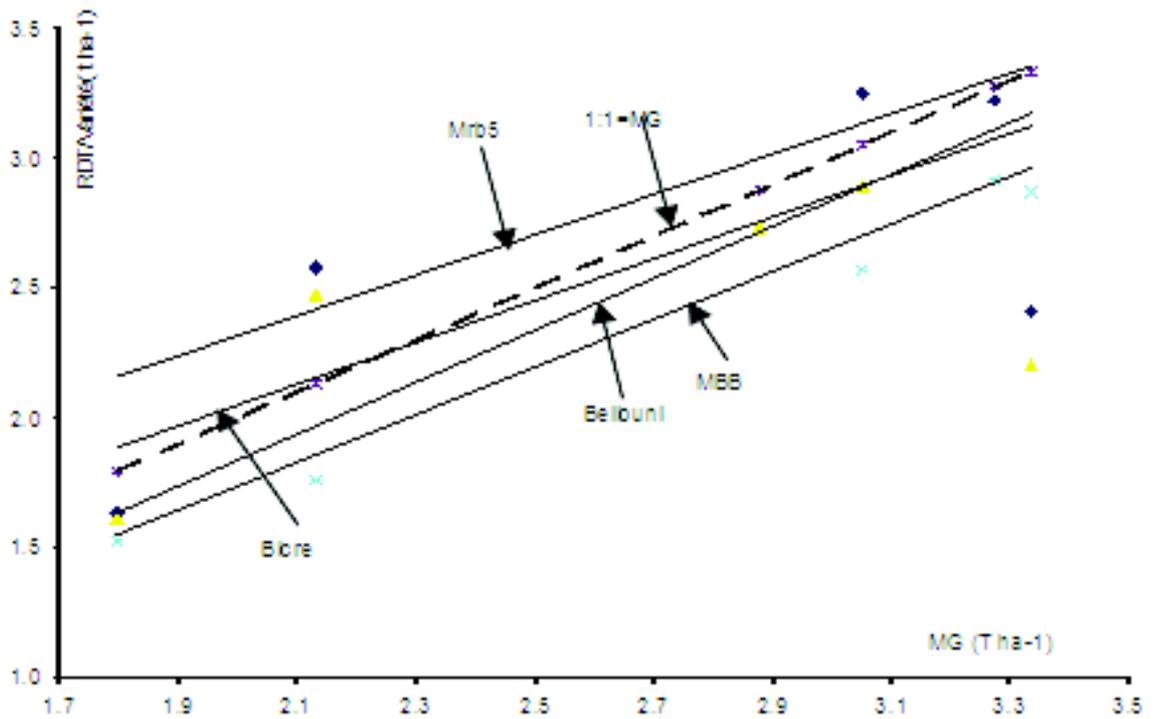


Figure III. 5. Tendence des performances de rendement des génotypes tolérants les stress.

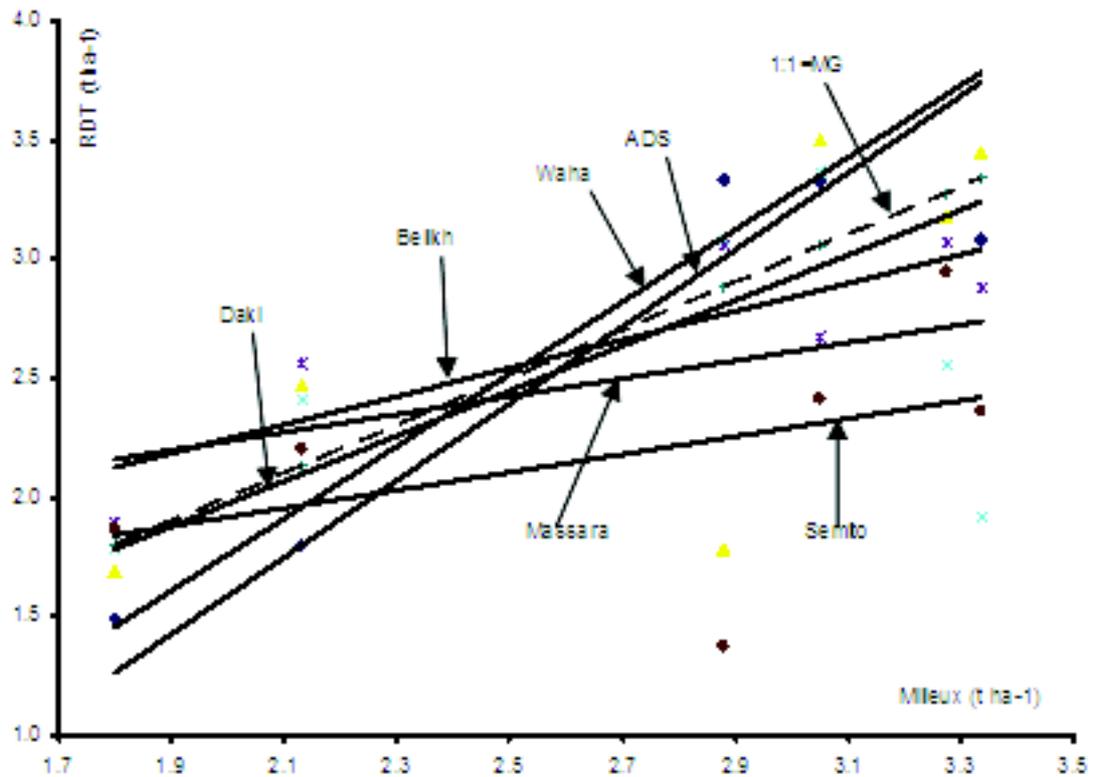


Figure III. 6. Tendence des performances de rendement des génotypes tolérants et performants sous stress.

En sélection, comme en production, le génotype performant est désirable, il est l'est encore mieux si ses performances sont stables, donc s'il tolère les stress prévalant dans la région ciblée. Cette plasticité est importante notamment lorsque le milieu est sujet à des variations, telle que la succession des années ou le changement d'un milieu à un autre, plus ou moins favorable à l'expression des performances.

Les indices de la tolérance aux stress sont très utiles en sélection des plantes, notamment en présence d'interaction génotype x environnement (Kang, 1993). Les résultats de la présente étude indiquent la présence de l'interaction génotype x milieu. Les indices de tolérance utilisés classent différemment les génotypes évalués et forment deux groupes divergents comme l'indique l'analyse en composantes principales.

Le premier groupe est formé des indices P, MP, GMP et STI qui s'opposent aux indices S et YSI. Le second groupe est formé des indices RY et YI qui s'opposent à l'indice HMP. Les indices P, MP, GMP et STI sont plus aptes à identifier les génotypes qui associent le potentiel de rendement et la tolérance aux stress. Les génotypes identifiés par ces indices appartiennent aux classes A et B décrites par Fernandez (1992). Les indices S et YSI identifient des génotypes tolérants les stress, et appartenant aux classes C et D. Par contre, les indices RY et YI identifient des génotypes du groupe B, performants sous conditions favorables ; alors que l'indice HMP identifie des génotypes de la classe C, performants, surtout, sous conditions de stress hydrique.

Pour l'application en sélection dans une région semi-aride, les résultats suggèrent d'utiliser l'un des indices P, MP, GMP ou STI, lorsque la sélection est orientée vers la performance et la tolérance au stress. Dans le cas où l'on privilégie la sélection des génotypes tolérants et plus performants sous conditions de stress, il est conseillé d'utiliser l'indice HMP. L'utilisation de ces indices a identifié les génotypes Cyprus₁ et Heider/Martes// Huevos de Oro comme étant les plus tolérants et performants sur l'ensemble des milieux. Elle a identifié aussi Waha et Adamillo/ Duilio//Simeto comme tolérants et performants uniquement dans les milieux favorables et les génotypes Massara₁ et Belikh₂ comme tolérants et performants dans les milieux non favorables.

Les génotypes Daki, Bicre, Béliouni, MBB et Sémito se caractérisent par un faible potentiel de rendement. Ces résultats corroborent ceux de Ahmad *et al.*, (1999) qui rapportent que les indices MP, GMP et STI sont plus aptes à identifier les génotypes à haut potentiel de rendement sous conditions irriguées et en sec. Ils vont aussi dans le même sens que les résultats de Pinter *et al.* (1990) qui mentionnent que l'indice RY identifie des génotypes tolérants et performants sous stress hydrique. L'indice YI proposé par Gavuzzi *et al.*, (1997) est corrélé avec le rendement du milieu non favorable comme le mentionnent de Sio-Se Mardeh *et al.*, (2006). Cet indice classe les génotypes sur la seule base de leur performance dans le milieu contraignant. Il est inapte à identifier les génotypes de la classe A.

Conclusion

L'étude comparative des indices de la tolérance au stress indique que les indices forment deux groupes, l'un représentant la tolérance liée au potentiel de rendement et l'autre comportant les indices qui mesurent la tolérance liée aux performances sous stress. Parmi les indices de la tolérance étudiée, les indices P, GMP, MP et STI identifient les génotypes

de la classe A. Les indices S et TOL identifient les géotypes de la classe C. Les indices RY, YI et HMP identifient les géotypes appartenant aux classes B et D.

Parmi les géotypes évalués Cyrus₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro sont identifiés comme étant tolérant la contrainte hydrique et performants l'ensemble des milieux testés. Waha et Adamillo/Duilio/ Simeto sont tolérants et performants dans les milieux favorables. Par contre Massara₁ et Belikh₂ sont performants dans les milieux contraignants. MBB, Simeto, Beliouni se caractérisent par un faible potentiel de rendement sur l'ensemble des milieux. En sélection sous conditions variables telles que celles de la présente étude, il est suggéré d'utiliser l'un des indices suivants P, MP, GMP ou STI qui associent tolérance et performance de rendement.

Chapitre IV :Etude de la tolérance du blé dur (*T. durum* Desf.) aux stress abiotiques sous conditions semi-arides : Stabilité du rendement et discrimination isotopique du carbone

Résumé.

L'expérimentation a été conduite au cours de six campagnes, de 1998 à 2003, et avait pour objectif l'étude de la relation entre le rendement grain, la stabilité temporelle et la discrimination isotopique du carbone chez les géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) évalués sous conditions semi-arides des hautes plaines de l'Est algérien. Les résultats du rendement grain indiquent un effet campagne et une interaction géotype x campagnes significatifs et un effet géotype non significatif. Le rendement grain mesuré au cours des six campagnes ne montre pas de liaisons significatives avec $\Delta^{13}\text{C}$ mesuré au cours d'une seule saison. Le signe négatif des coefficients de corrélation suggère que les géotypes ayant un faible $\Delta^{13}\text{C}$ sont plus aptes de maintenir la croissance sous conditions semi-arides que les géotypes présentant un $\Delta^{13}\text{C}$ élevé. La sélection pour de faibles valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ est attractive mais demande à être confirmée par d'autres études complémentaires sous les mêmes conditions.

Most clés : *Triticum durum* - performance de rendement - stabilité temporelle - discrimination isotopique du carbone - climat méditerranéen.

Abstract.

The experiment was conducted during six cropping seasons (1998 to 2003), with the objective to study the relationship between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown under semi-arid conditions of the Eastern high plains of Algeria. Results indicated significant season and genotype x season interaction for grain yield and a non significant genotypic main effect. Grain yield measured during six cropping seasons was not significantly correlated with $\Delta^{13}\text{C}$ measured during one season-test. The negative sign of the correlation coefficients indicated that genotypes having low $\Delta^{13}\text{C}$ have more room to sustain growth than high $\Delta^{13}\text{C}$ genotypes under the semi-arid conditions. Selection efficiency for low $\Delta^{13}\text{C}$ seems appealing but still needs to be confirmed under such environment.

Key words : *Triticum durum* - yield performance - temporal stability - carbon isotope discrimination - Mediterranean climate.

Introduction

Sous conditions climatiques variables, similaires à celles qu'on rencontre, le plus souvent, dans les régions arides et semi-arides, la sélection vise l'identification des variétés qui donnent de hauts rendements sous un large éventail de situations agro-climatiques (Annichiarico, 1992 ; Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Benmahammed *et al.*, 2010). La sélection des génotypes qui cumulent performance et large adaptation est difficile en présence de l'interaction (Bahlouli *et al.*, 2005 ; Annichiarico *et al.*, 2006). En effet, les caractères de l'architecture de la plante qui affectent la performance, s'expriment différemment selon le milieu, et de ce fait, ils contribuent substantiellement à l'interaction génotype x milieu (Blum et Pnuel, 1990). La présence de l'interaction affecte la relation entre le phénotype et le génotype, ce qui a pour conséquence de réduire de l'efficacité de la sélection (Lecompte *et al.*, 2002 ; Singh *et al.*, 2006).

Pour améliorer l'efficacité de la sélection, en présence de l'interaction, les sélectionneurs ont développé les essais comparatifs du rendement grain multi-sites et multi-années. Ces essais permettent d'estimer, avec une plus grande précision, la performance et la stabilité génotypique (Ebdon et Gauch, 2002 ; Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005). Lorsque l'interaction est liée à la variation spatiale, la sélection pour l'adaptation spécifique à la région ciblée, est favorisée (Annichiarico *et al.*, 2002 ; 2005). Par contre, lorsque l'interaction est liée à la variation temporelle, suite au changement d'une année à l'autre des conditions climatiques, la sélection des génotypes à large adaptation, passe-partout, est favorisée (Lin *et al.*, 1986 ; Atlin *et al.*, 2000 ; Yan et Hunt, 2001).

L'interaction génotype x environnement est pratiquement présente, dans le processus de sélection, sous condition arides et semi-arides, parce que la variation interannuelle des conditions climatiques est la principale source de variation des rendements. Aussi, il est conseillé de conduire les essais sur plusieurs années, pour une même localité, vu qu'un grand nombre d'essais améliore la précision du potentiel du rendement et de la réaction du génotype à la variation de l'environnement (Roseille et Hamblin, 1981).

Dans ce contexte, la stabilité temporelle du rendement est définie comme une minimisation du risque de faible rendement associée à une faible amplitude entre environnements extrêmes (Condon *et al.*, 1987 ; Ceccarelli *et al.*, 1998). En effet, lorsque la sélection cible des variétés destinées aux régions à fortes contraintes climatiques, l'évitement des rendements faibles à nuls devient un objectif prioritaire. Ceci parce qu'une grande partie des surfaces emblavées en céréales, sous ces conditions, est conduite sous faibles inputs par des agriculteurs qui possèdent peu de moyens pour supporter le sinistre (Ceccarelli *et al.*, 1998).

Des études, conduites sur céréales, montrent la possibilité d'utiliser la discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) comme un critère apte à identifier des génotypes tolérants les contraintes climatiques, notamment le stress hydrique (Craufurd *et al.*, 1991 ; Hafsi, 2001 ; Araus *et al.*, 2003). Craufurd *et al.*, (1991) rapportent une corrélation entre le rendement grain et $\Delta^{13}\text{C}$ qui est significative en l'absence de stress et non significative sous contraintes climatiques. Selon Condon *et al.*, 2004, le rendement grain et $\Delta^{13}\text{C}$ sont liés à la phénologie, vu que les génotypes précoces, échappent aux contraintes climatiques et, de ce fait, présentent de hauts rendements associés à des valeurs élevées de $\Delta^{13}\text{C}$.

$\Delta^{13}\text{C}$ est considéré comme une caractéristique génotypique stable, ce qui suppose que la classification des génotypes pour $\Delta^{13}\text{C}$ change peu, d'un environnement à l'autre. Sayre *et al.*, (1995) rapportent une corrélation significative entre $\Delta^{13}\text{C}$ mesurée sous stress hydrique et $\Delta^{13}\text{C}$ mesurée sous conditions irriguées. Ces résultats suggèrent une héritabilité élevée de cette caractéristique associée à l'absence d'interaction génotype x environnement significative. Selon Farquhar et Richards, (1984), la relation entre $\Delta^{13}\text{C}$ et la stabilité du rendement grain est variable. L'objectif de cette étude est d'analyser la relation entre la performance de rendement, la stabilité du rendement et la $\Delta^{13}\text{C}$ du le blé dur (*Triticum durum* Desf) conduit sous conditions semi-arides des hautes plaines.

IV.1.Materiel et méthodes

IV.1.1. Conduite des essais, notations et discrimination isotopique du carbone

Le dispositif expérimental et la conduite des essais sont décrits plus haut, dans le chapitre II. La date d'épiaison a été notée par parcelle élémentaire, estimée par le nombre de jours calendaires du 1^{ier} janvier à la date de sortie de 50% des épis. La hauteur des plantes est mesurée à maturité, juste avant la récolte mécanique des essais. Un rang de 1 m de long est récolté manuellement pour avoir les estimations de la matière sèche accumulée, le nombre d'épis et le poids de 1000 grains. Le rendement grain est déterminé suite à la récolte mécanique des essais. Le nombre moyen de grains par épi et par mètre carré de sol semé sont déduits des valeurs parcellaires du rendement, des épis et du poids de 1000 grains.

La discrimination isotopique du carbone a été effectuée par spectrométrie de masse à l'Institut de Biotechnologie des plantes de l'Université de Paris-Sud (France). Les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ du grain sont rapportées en écarts pour mille relativement à la concentration carbonique de l'air égale à -7.85 ‰, en référence à celle du Pee Dee Bélemnite (PDB) selon

la procédure décrite par Farquhar et Richards (1984). $\Delta^{13}\text{C}$ a été déterminée sur le grain de la campagne 2001/02 pour 8 géotypes seulement, pour des raisons de moyens financiers.

La discrimination isotopique du carbone s'explique par le fait que durant la photosynthèse toutes les plantes désavantagent les isotopes plus lourds de carbone en absorbant proportionnellement moins de C_{13} et de C_{14} . Il y a donc fractionnement isotopique du carbone (Condon *et al.*, 2004). L'importance du fractionnement isotopique dépend du type de photosynthèse mise en action par les plantes. La plupart des plantes sont de type C_3 , parce qu'elles produisent une molécule de trois atomes de carbone en suivant le cycle photosynthétique de Calvin-Benson. Les plantes C_3 retiennent plus le carbone C_{12} que le C_{13} (Rebetzke *et al.*, 2007 ; Fig.IV.1).

L'importance du fractionnement isotopique exercé par la plante est mesurée par le rapport entre C_{12} et C_{13} , dit $\Delta^{13}\text{C}$, qui est exprimé en parties par mille par rapport à une norme connue, notamment celle de Pee Dee Belemnite (PDB). Le Belemnite est un fossile calcaire du Crétacé trouvé à Pee Dee, en Caroline du sud. La plupart des matières organiques contiennent moins de C_{13} que de PDB, donnant des valeurs négatives au $\Delta^{13}\text{C}$.

Les plantes C_3 ont des valeurs $\Delta^{13}\text{C}$ s'approchant de -25 ‰, alors que les valeurs $\Delta^{13}\text{C}$ des plantes C_4 ont un écart de -10 à -12,5‰.

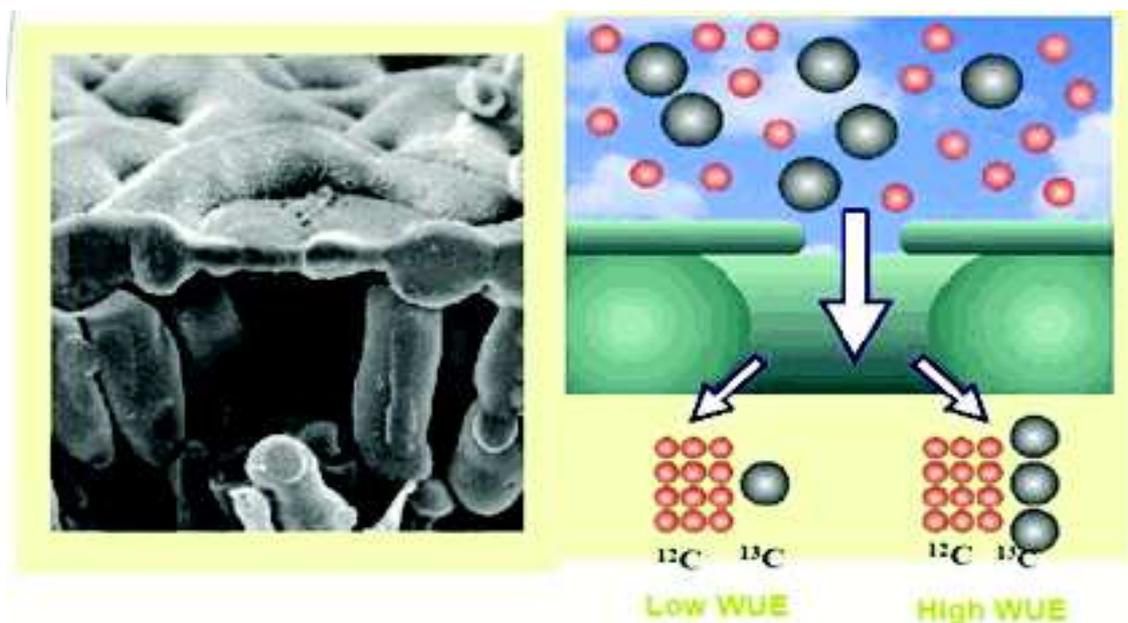


Figure IV.1. Discrimination isotopique du carbone chez les plantes de type C_3 (Rebetzke *et al.*, 2007).

IV.1.2. Analyse des données

Les données collectées sont soumises à l'analyse de la variance, selon la procédure "analyse de la variance équilibrée" de **CropStat 7.2.3. (2009)**. Les analyses ont été conduites en considérant les années comme facteur aléatoire et les géotypes comme facteur fixé.

Les tests des effets année, génotype et leur interaction sont faits selon la procédure décrite par McIntosh (1983) (Tab.IV.1).

Les coefficients de corrélation ont été calculés en utilisant la procédure du logiciel Statistof (1993). Le rendement grain et le $\Delta^{13}\text{C}$ sont ajustés pour l'effet du degré de précocité en utilisant le nombre de jours calendaires du 1^{er} janvier à la date de réalisation de l'épiaison comme covariable :

$$\text{Rendement ou } \Delta^{13}\text{C ajusté} = Y_i - b (X_i - X_{\text{bar}})$$

où Y_i est le rendement ou $\Delta^{13}\text{C}$ observé du $i^{\text{ème}}$ génotype, X_i est le nombre de jours calendaires à l'épiaison du $i^{\text{ème}}$ génotype et X_{bar} est la moyenne du nombre de jours calendaires du 1^{er} janvier à l'épiaison des génotypes évalués.

Sources de variation	CME	F-test	EMS
Année (A)	m_1	$(m_1+m_5)/(m_2+m_4)$	-
Blocs/Années	m_2	-	-
Génotype (G)	m_3	m_3/m_4	$\sigma_e^2 + r\sigma_{G \times A}^2 + r_A\sigma_G^2$
G x A	m_4	m_4/m_5	$\sigma_e^2 + r\sigma_{G \times A}^2$
Erreur pondérée	m_5	--	σ_e^2

r, G, A sont les répétitions, génotypes et les années, CME = moyennes des carrés des écarts, EMS = Espérance moyenne attendue.

Tableau IV.1. F-test des effets année, génotype et leur interaction pour un dispositif en blocs complètement randomisés répétés dans le temps (McIntosh, 1983)

La stabilité temporelle (li) a été calculée comme le produit du coefficient de régression de Finlay et Wilkinson (1963) et la variance inter années. La variance inter années pour l'ensemble des génotypes est calculée par :

$$\sigma^2_y = \sum (Y_{.j} - Y_{..})^2 / (A - 1)$$

Où $Y_{.j}$ = la moyenne des rendements de l'année j , $Y_{..}$ = la moyenne générale du rendement de tous les génotypes sur les 6 années et A = nombre d'années. La variance inter-années par génotype est calculée par :

$$\sigma^2_i = \sum (Y_{ij} - Y_{i.})^2 / (A - 1)$$

Où Y_{ij} = rendement du génotype i dans l'environnement j , $Y_{i.}$ = moyenne du rendement des 6 années du génotype i et A = nombre d'années. La stabilité temporelle (I_i) a été calculée d'après Eskridge (1990) par :

$$I_i = Y_{i.} - Z(1 - \alpha) [(b - 1)^2 \sigma^2_y (1 - 1/A)]^{1/2}$$

Où $Y_{i.}$ = Rendement moyen des 6 années du génotype i , $Z(1 - \alpha) = 1.64$, b = Coefficient de régression de Finlay et Wilkinson (1963), σ^2_y = Variance inter-années et A = nombre d'années.

IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.2.1. Variation du rendement et de la discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$)

L'analyse de la variance du rendement grain montre un effet année et une interaction génotype x années significatifs, par contre, l'effet génotype, testé relativement à l'interaction n'est pas significatif (Tab.IV.2). Le rendement grain par année varie de 180.3 à 333.5 g m⁻². Cette amplitude reflète largement les différences de pluviométrie enregistrées au cours des différentes campagnes d'évaluation (Tab.IV.3).

Sources de variation	RDT		$\Delta^{13}C$	
	ddl	CME	ddl	CME
Années (A)	5	179389.9**	--	--
Blocs/Années	12	1764.3	2	0.10
Génotype (G)	14	13699.8**	7	0.29*
G x A	70	15267.4**	--	--
Régression	15	24659.0**	--	--
Déviaton de la régression	55	12919.5**	--	--
Erreur pondérée	168	1358.1	14	0.10

** * = effet non significatif et significatif aux seuils de 5 et 1%, respectivement

Tableau .IV.2. Analyse de la variance du rendement

La pluviométrie enregistrée au cours de cycle de la culture (Octobre–Juin) varie de 168.7 à 517.3 mm. L'essentiel de cette pluviométrie est enregistré au cours de la période Automne–Hiver (Octobre–Mars), représentant 56 à 88% du cumul total enregistré au cours du cycle. Une relation du type quadratique est observée entre le cumul pluviométrique et le rendement grain moyen annuel. Des réponses linéaires sont notées pour certains génotypes tel que Mrb₁₆/Ente//Mario, alors que d'autres génotypes ne valorisent pas les années à forte pluviométrie (Tab.IV.3, Fig.IV.2).

La présence de l'interaction G x A indiquée par l'analyse de la variance est suggérée par le changement des performances de rendement grain des différents génotypes évalués au cours des différentes campagnes. Mrb₅ se classe en tête durant trois campagnes, Cyprus₁, Bicre et Daki occupent la tête de classement pendant deux campagnes et Waha, Belikh₂ et Heider/Martes//Huevos de Oro au cours d'une seule campagne (Tab.IV.3). Ceci indique que les génotypes évalués présentent une faible stabilité de performance d'une campagne à l'autre.

Tableau.IV.3. Pluie enregistrée et moyennes du rendement grain par année.

Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Pluie /cycle (mm)	393.3	233.1	299.1	264.3	168.7	517.5
Pluie hivernale (PH)	220.7	198.2	188.0	231.8	134.2	375.9
Pluie printemps (PP)	172.6	34.9	111.1	32.5	34.5	141.6
Ratio PH/PP	0.56	0.85	0.63	0.88	0.80	0.73

Pluie cycle = cumul octobre à juin, pluie hiver = cumul octobre à mars, pluie printemps = cumul avril à juin. Ppds_{5%} = 36.11 g m⁻².

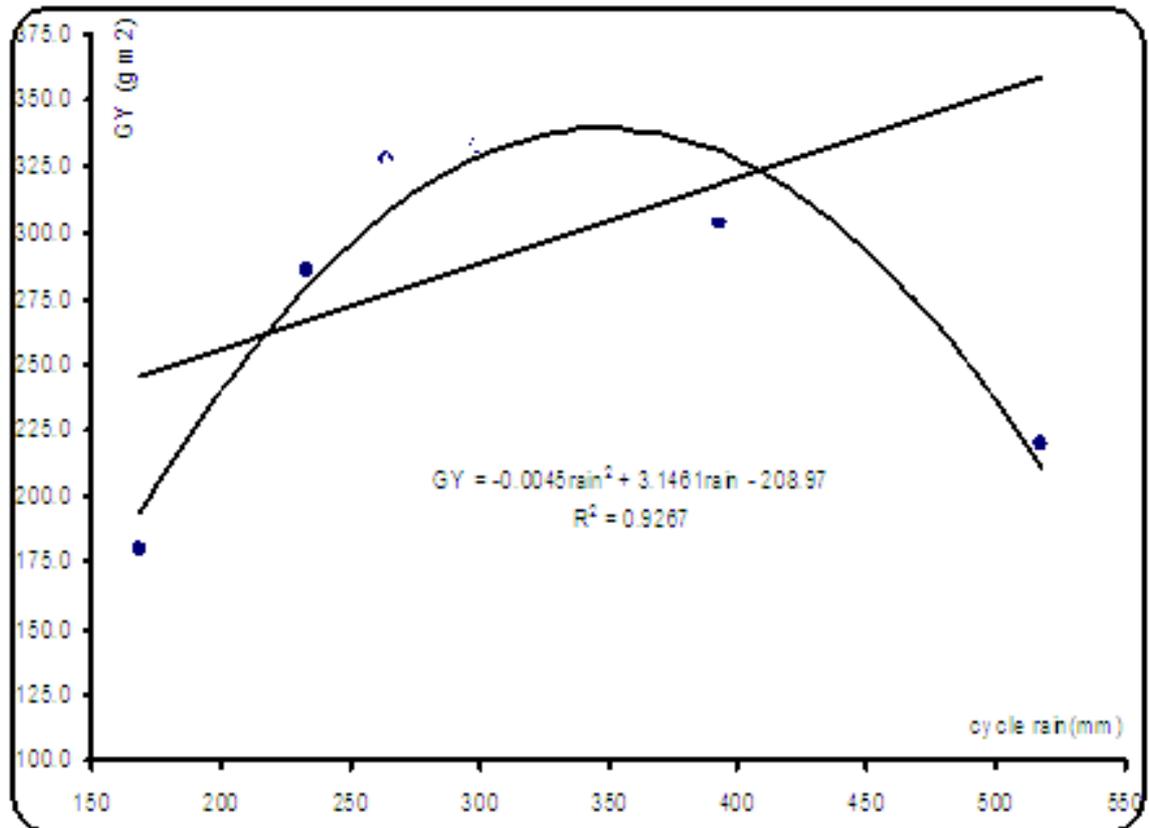


Figure.IV. 2. Variation du rendement gain en fonction du cumul pluviométrique enregistré au cours du cycle de la culture et réponse linéaire de Mrb₁₆/Ente//Mario

Mrb₁₆/Ente//Mario, Belikh₂, Heider, 439/ADS, Waha and Béliouni possèdent une faible variance des rendements des différentes campagnes, alors que Cyprus₁ et Deraa ont une variance élevée. Heider et Mrb₁₆/Ente//Mario présentent une stabilité temporelle élevée comparativement à Deraa qui a une faible stabilité (Tab.IV.4).

La discrimination isotopique du carbone mesurée au cours de la campagne 2001/2002 montre un effet génotype significatif. La moyenne varie de 15.60 à 16.40 ‰ indiquant des différences génotypes pour $\Delta^{13}\text{C}$ (Tab.IV.2 et 4). Ces valeurs moyennes sont proches de celles rapportées dans la littérature pour les espèces de type C₃, variant de 13.0 à 22.0 ‰ (Condon *et al.*, 2004 ; Araus *et al.*, 2002 ; Sayre *et al.*, 1995 ; Ebdon *et al.*, 1998).

Genotype	$\sigma^2 \times 10^6$	I_i	RDT	$\Delta^{13}C$
439/Adamillo//Duillio/3/Simeto	1.6	207.8	273.5	--
Massara	3.4	142.7	237.9	--
Mrb5	6.7	165.5	300.5	15.76
Cyprus1	12.4	129.7	312.4	--
Waha	2.4	204.0	283.7	--
Belikh2	1.4	197.9	260.3	15.82
Mrb16/Ente/Mario	0.5	239.4	240.1	15.60
Bicre	3.1	170.6	261.7	16.40
Derraa	15.6	92.9	298.4	16.02
Daki	4.3	170.8	279.1	15.66
Heider/Martes//Huevos de Oro	4.0	208.5	312.4	--
Heider	1.6	245.5	293.4	15.98
Mohammed Ben Bachir	6.4	161.5	241.1	--
Simeto	4.1	135.6	220.2	16.40
Beloumo3258	2.6	172.5	257.0	--

Ppds 5% du rendement = 200.1 g m⁻², de $\Delta^{13}C$ = 0.55 ‰

Tableau.IV.4. Coefficient de régression (*b*), variance inter-années (σ^2), stabilité temporelle (I_i , g.m⁻²), moyennes des rendements (RDT, g m⁻²) et la discrimination isotopique du carbone du grain ($\Delta^{13}C$ ‰)

Selon Sayre *et al.* (1995), les différences génotypiques de $\Delta^{13}C$ représentent celles du ratio C_i/C_a et sont principalement causées par la variation de l'assimilation pondérée par la conductance stomatique plus que par la capacité photosynthétique. Delgado *et al.* (1994) mentionnent qu'en absence de stress, les valeurs élevées sont le reflet d'un taux rapide d'assimilation lié à une amélioration de la conductance stomatique conduisant à une amélioration du rendement grain. Des valeurs élevées de $\Delta^{13}C$ sont aussi indicatrices d'une transpiration élevée de la canopée ce qui adoucit la température de la feuille, esquivant de ce fait le stress thermique (Araus *et al.*, 2003 ; Condon *et al.*, 2004).

Sous les conditions de stress hydrique terminal associé à l'augmentation de la radiation solaire et de la température de l'air ambiant, similaires à celles qui caractérisent l'environnement où sont évalués les génotypes de la présente étude, les variétés précoces ont tendance à avoir des valeurs élevées de $\Delta^{13}C$. Ceci parce qu'elles assimilent le gros de leur carbone sous des conditions de faibles valeurs de tension de déficit de vapeur, comparativement à des génotypes tardifs.

IV.2.2. Relation entre le rendement grain, $\Delta^{13}\text{C}$ et les variables mesurées par année

Le rendement grain ne montre aucune liaison significative avec les valeurs prises par la stabilité temporelle I ($r = 0.170^{\text{NS}}$), ni avec la variance inter années du rendement grain ($r = 0.451^{\text{NS}}$). La stabilité temporelle est négativement corrélée avec la variance inter-campagne ($r = -0.807^*$) suggérant que les génotypes répondant moins aux conditions favorables de croissance, ont tendance à être relativement plus stables d'une année à l'autre, que les génotypes sensibles à la variation de la fertilité du milieu. Les premiers présentent moins de risque que les seconds.

Parmi les huit génotypes dont la discrimination isotopique a été mesurée, le rendement grain est significativement et positivement corrélé au nombre de grains produit par m^2 et à l'indice de récolte des six campagnes étudiées. Le rendement grain est, cependant, soit corrélé positivement avec le nombre de grains par épi ou bien avec le nombre d'épis produit par m^2 , mais rarement avec les deux en même temps (Tab.IV.5).

Ceci indique que chaque année, le rendement est la résultante du nombre de grains produit par m^2 , dont les déterminants sont soit le nombre d'épis produit par m^2 ou le nombre de grains par épi, selon l'année. Ces deux composantes contribuent à l'amélioration de l'indice de récolte. Les coefficients de corrélation du rendement grain avec la biomasse aérienne mesurée au stade épiaison, avec la hauteur de la plante, et avec la durée de la phase végétative, exprimée en jours calendaires ou en degrés jours, ne sont pas significatifs (Tab.IV.5).

Les corrélations des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ avec les variables mesurées sont inconsistantes et en générale non significatives notamment avec le rendement grain, le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et avec la durée de la phase végétative. $\Delta^{13}\text{C}$ présente cependant des corrélations significatives et négatives avec le nombre de grains par m^2 , la hauteur de la végétation, et des corrélations positives avec le poids de 1000 grains, au cours de deux campagnes (Tab.IV.5).

La corrélation de $\Delta^{13}\text{C}$ avec la stabilité temporelle est négative, n'atteignant pas le seuil de signification statistique ($r = -0.420^{\text{NS}}$).

	NGM ²	NGE	NE	PMG	BIO	HI	HT	Prec _j	Prec _J	RDT
1998										
RDT	0.94**	0.76*	0.77*	-0.27	0.07	0.73*	-0.28	0.22	0.16	1.00
$\Delta^{13}C$	-0.34	-0.30	-0.06	-0.22	-0.43	-0.04	-0.15	-0.29	-0.20	-0.44
1999										
RDT	0.98**	0.62	0.62	-0.05	0.24	0.74*	-0.45	0.62	0.58	1.00
$\Delta^{13}C$	-0.27	0.15	-0.62	0.14	-0.12	-0.14	0.59	-0.04	-0.02	-0.29
2000										
RDT	0.98**	0.79*	0.58	-0.19	-0.67	0.96**	-0.26	0.31	0.31	1.00
$\Delta^{13}C$	-0.18	-0.16	-0.19	0.04	0.73*	-0.44	0.40	-0.16	-0.18	-0.22
2001										
RDT	0.76*	0.78*	0.27	-0.25	-0.59	0.86**	0.66	-0.35	-0.33	1.00
$\Delta^{13}C$	-0.89**	-0.46	-0.66	0.79*	0.52	-0.64	-0.74*	0.16	0.13	-0.64
2002										
RDT	0.74*	0.73*	0.27	0.17	0.09	0.74*	-0.22	0.01	0.02	1.00
$\Delta^{13}C$	-0.72*	-0.29	-0.16	0.71*	0.66	-0.64	-0.76*	-0.45	-0.43	-0.19
2003										
RDT	0.77*	-0.09	0.83**	0.14	0.45	0.76*	0.63	0.23	0.22	1.00
$\Delta^{13}C$	0.06	0.41	-0.33	-0.59	-0.27	-0.79*	-0.56	-0.25	-0.25	-0.63

NGM² = nombre de grains m², NGE = nombre de grains par épi, NE = nombre d'épis / m², PMG = poids de 1000 grains, BIO = biomasse aérienne à l'épiaison, HI = indice de récolte, HT = hauteur de la plante, Prec_j et Prec_J = respectivement nombre de jours calendaires et de degrés jours à l'épiaison

Tableau.IV.5. Coefficients de corrélations phénotypiques entre le rendement grain, $\Delta^{13}C$ et les variables mesurées par campagne

Les résultats de la présente étude ne corroborant pas ceux de Sayre *et al.* (1995) qui rapportent une liaison positive entre $\Delta^{13}C$ et le rendement grain sous conditions de stress hydrique. Araus *et al.* (2003) rapportent eux aussi une corrélation positive entre $\Delta^{13}C$ et le rendement grain, en moyenne d'un réseau d'essais. Ces auteurs mentionnent que le degré de satisfaction des besoins en eau au cours de la période de remplissage du grain représente la variable qui explique le mieux la variation du rendement, de $\Delta^{13}C$ et de leur liaison.

Craufurd *et al.* (1991), par contre, rapportent une corrélation négative entre le rendement grain et $\Delta^{13}C$ chez l'orge. Selon Araus *et al.* (2002), une liaison négative est attendue entre le rendement grain et $\Delta^{13}C$ ou bien entre $\Delta^{13}C$ et la biomasse aérienne, sous conditions méditerranéennes. Ceci parce que la végétation subit des stress hydrique et thermique en fin de cycle. Sous les conditions climatiques, similaires à celles sous lesquelles la présente étude a été conduite, un haut rendement grain est lié à une efficacité élevée de la transpiration associée à de faibles valeurs de $\Delta^{13}C$. Condon *et al.* (2004) notent cependant une grande variabilité dans la relation qui lie le rendement grain et $\Delta^{13}C$; cette relation pouvant être négative, neutre ou positive.

La relation entre le rendement grain et $\Delta^{13}C$ est très sensible à l'alimentation hydrique du génotype au cours du cycle et notamment au cours de la phase de remplissage du grain.

Cette relation exprime la capacité génotypique d'utilisation de l'eau. Une relation positive est observée entre ces deux variables, dans les environnements où la pluviométrie est plus régulière au cours du cycle, assurant une alimentation hydrique régulière de la végétation

Dans ces environnements, une croissance rapide des géotypes ayant un $\Delta^{13}\text{C}$ élevé s'est toujours, plus ou moins, traduite par une production élevée de biomasse aérienne et/ou de rendement grain (Condon et al., 2002). Cependant, sous les conditions favorisant une croissance précoce rapide, les géotypes, dont le $\Delta^{13}\text{C}$ est élevé, utilisent rapidement l'humidité du sol disponible avant l'avènement de l'épiaison, laissant peu pour la phase de remplissage du grain et de ce fait produisent un faible rendement grain. Sous de telles conditions, les géotypes ayant un faible $\Delta^{13}\text{C}$ valorisent mieux l'humidité du sol, et soutiennent le remplissage du grain, grâce à l'humidité économisée, et aux assimilés stockés dans la tige qui sont transférés vers le grain (Voltas et al., 1999 ; Rebetzke et al., 2002).

En effet une corrélation positive entre $\Delta^{13}\text{C}$ et le rendement grain est indicatrice de la capacité différentielle des géotypes à utiliser plus d'humidité alors qu'une corrélation négative est indicatrice d'une meilleure valorisation de l'humidité disponible. La sélection pour des valeurs élevées de $\Delta^{13}\text{C}$ améliore le potentiel de rendement grain sous conditions favorables, alors que la sélection de faibles valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ améliore l'adaptation aux conditions contraignantes.

Sous les conditions climatiques de la présente étude, $\Delta^{13}\text{C}$ tend à être négativement corrélée avec le rendement et avec les composantes, quoique la corrélation n'est pas significative, probablement à cause du faible nombre de géotypes. La sélection pour de faibles valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ peut constituer une méthode utile pour améliorer indirectement l'efficacité de la transpiration et le rendement grain du blé dur sous conditions de faible pluviométrie lorsque la transpiration est une composante majeure de l'utilisation de l'eau.

Conclusion

La sécheresse et les températures élevées sont les principales contraintes de la production des céréales des pays du sud de la méditerranée. La sélection des géotypes tolérants est le moyen le plus sûr pour stabiliser et augmenter le rendement grain dans tels environnements où les essais multi-sites et multi-saisons sont généralement conduits pour analyser l'amplitude de l'interaction géotype x environnement rencontrée. Considéré comme un caractère facilement mesuré et hautement héritable, $\Delta^{13}\text{C}$ est suggéré comme un candidat potentiel en sélection pour l'adaptation aux situations où le déficit hydrique est la principale contrainte. Cette sélection permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante en augmentant l'assimilation relativement à la transpiration. Les résultats de la présente étude montrent que le rendement grain mesuré au cours de 6 campagnes agricoles n'est pas significativement corrélé avec $\Delta^{13}\text{C}$, mesuré au cours d'une seule campagne. Le signe négative de la corrélation suggère que les géotypes ayant une faible valeur de $\Delta^{13}\text{C}$ possèdent des capacités plus grandes à maintenir la croissance sous stress comparativement à ceux qui ont des valeurs élevées de $\Delta^{13}\text{C}$. De ce fait, la sélection

pour de faibles valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ semble intéressante et conseillée mais elle reste encore à confirmer par d'autres études.

CONCLUSION GENERALE

La zone méditerranéenne se caractérise par une grande variabilité de son climat dans le temps et l'espace, induisant d'importantes variations du rendement et dégageant une forte irrégularité de la production. Pour ce type de milieux très variables, avec de forte interaction génotype x environnement, la sélection directe sur le rendement en grain s'est avérée peu efficace. Dans de tels types d'environnements, la stratégie de sélection doit s'orienter vers la caractérisation des milieux ciblés et rechercher de nouveaux outils de sélection indirecte basée sur les marqueurs morpho-physiologiques d'adaptation.

Le travail qui vient d'être présenté fait partie d'un programme WANADIN (West Asia and North Africa Durum Improvement Network) en collaboration avec le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MERSR), l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRA) et l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC). Cette étude réalisée en zone semi-aride d'altitude, comporte trois grands chapitres déterminant la variabilité interannuelle des réponses du rendement en grain à la sélection, les effets de la sélection des caractères physiologiques sur le potentiel du rendement, les relations entre le rendement, la stabilité temporelle et la discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) qui nous permettent de sélectionner des génotypes dans les conditions variables et à fortes contraintes.

Les résultats des six campagnes indiquent des différences de performances entre génotypes qui varient selon les campagnes, tout en indiquant que les meilleures lignées présentent la caractéristique dont le rendement varie significativement d'une année à l'autre mettant ainsi en relief, l'effet année et l'interaction génotype x année comme principaux facteurs responsables de la variation. A ce sujet, il est important de signaler la stabilité et la supériorité des génotypes Cyprus₁, et Heider/Mt//HO. Dans les conditions de stress, la variation du rendement est en partie attribuée à la sensibilité du matériel végétal. L'analyse des valeurs des indices de tolérance aux stress a abouti à la formation de deux groupes de lignées, l'un représentant la tolérance au potentiel de rendement et le second comportant les indices de la performance aux stress. Le premier groupe comporte les résultats des indices P, GMP, MP et STI identifiant les génotypes de la classe A, à l'exemple de Cyprus₁, Deraa et Heider /MT//HO montrent les meilleures valeurs pour ces indices.

Alors que les lignées Massara₁, Simeto, MBB, H/MT//HO et Deraa appartenant à la classe C et prenant progressivement les valeurs faibles à élevées, sont identifiées par les indices S et TOL. Les indices RY, YI et HMP identifient les génotypes Cyprus₁, Héider, H/Mt//Ho et MRB₁₆/Ente/Mario, appartenant aux classes B et D, se comportant de manière similaire vis-à-vis du stress et les lignées Cyprus₁, Heider/MT//HO comme étant tolérant à la contrainte hydrique et performants sur l'ensemble des milieux testés. Les génotypes Waha, ADS sont tolérants et perforants sous conditions favorables, alors que Massara₁ et belikh₂ sont considérées comme performants en milieux contraignants. Les MBB, Simeto et Belioni se caractérisent par un faible potentiel de rendement sur l'ensemble des milieux.

Quand au carbone 13, seulement nos résultats indiquent que le rendement en grain mesuré sur 6 campagnes n'est pas significativement corrélé à Δ analysé durant une

seule campagne. La discrimination isotopique du carbone 13 ne pourrait pas être utilisée routinièrement dans le criblage des génotypes de blé dur caractérisés par une EUE élevée dans les environnements à eau limitée des hautes plaines algériennes. D'autre part, il semble être un bon critère pour l'amélioration du rendement en grain en conditions semi-arides, c'est un caractère hautement héritable, relativement facile à manipuler. Il semble être un candidat pour l'utilisation en sélection pour améliorer l'EUE via une assimilation relativement plus grande de la transpiration. En plus, il a un autre avantage lié au stockage des échantillons (grains) pour d'éventuelles analyses. Malheureusement le coût d'analyse est assez élevé et empêche l'utilisation de cette méthode quand il s'agit d'un grand nombre d'échantillons.

Poursuivant ce travail, il est utile d'approfondir les études sur la discrimination du ^{13}C , dans un objectif de sélection, qui portera sur les grains des 15 génotypes et sur plusieurs campagnes agricoles, ainsi que sur la feuille étendard sur des sites contrastés, la discrimination isotopique du carbone pourrait également s'avérer un outil précieux pour l'étude de la participation de chaque organe photosynthétique de la plante au cours du remplissage du grain. Pour se faire, il souhaitable que nos laboratoires nationales soient dotés d'équipement concernant cette technique pour qu'on cesse d'avoir recours au déplacement à l'étranger pour faire l'analyse.

La connaissance des milieux est très important pour connaître l'adaptation au milieu qui est synonyme d'interaction génotype x milieu, la stratégie de sélection doit s'orienter vers la caractérisation des milieux ciblés, rechercher de nouveaux outils de sélection indirecte basée sur les marqueurs morpho-physiologiques d'adaptation telles les avancées en biologie moléculaire, notamment la recherche de QTL (Quantitative Trait Loci ou régions du génome associées à l'expression "quantitative" de certains caractères agronomiques) et la nouvelle possibilité de séquencer le génome d'une espèce afin d'en faire l'inventaire des gènes permettant d'identifier les gènes d'adaptation, en particulier les gènes à effets pléiotropiques, jusqu'à là difficiles à détecter.

Références

- Abbassenne, F., H. Bouzerzour & L. Hachemi. 1998. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride d'altitude. *Annales Agronomiques de l'INA (Alger)*, **18** : 24- 36.
- Abou-el-Fittouh, H.A., Rawling, I.D. & Miller, P.A., 1969. Classification of environment interaction with an application to cotton. *Crop Sci.*, **9** : 134-140.
- Adjabi, A., H. Bouzerzour, C. Lelarge, A. Benmahammed, A. Mekhlouf & A. Hannachi. 2007. Relationships between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean conditions. *Journal of Agronomy*, **6** : 294-301.
- Ahmad, R., J.C. Stark, A. Tanveer & T. Mustafa. 1999. Yield potential and stability indices as methods to evaluate spring wheat genotypes under drought. *Agric. Sci.*, **4** : 53–59.
- Annicchiarico, P. 1992. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *J. Genet. & Breed.* **46**: 269- 278.
- Annicchiarico, P., 2002. Genotype X environment interactions. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. *FAO, Plant Production and Protection, Paper*, **174**, Rome.
- Annicchiarico P., F. Bellah & T. Chiari. 2005. Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Science*, **45**: 1741-1749.
- Annicchiarico P., Bellah F. & Chiari T., 2006. Repeatable genotype x location interaction and its exploitation by conventional and GIS- based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Euro. J. Agro.*, **24** : 70-81.
- Annicchiarico, P., Bellah F. & Chiari, T., 2006. Repeatable genotype location interaction and its exploitation by conventional and Gis-Based cultivar recommendation for durumwheat in Algeria. *Eur.J. Agro.*, **24** : 70-81.
- Annicchiarico, P., T. Chiari, F. Bellah, S. Doucene, N. Yallaoui-Yaici, F. Bazzani, L. Bouremel, M. Hamou, T. Hazmoun, M. Kelkouli, H. Ould Said & H. Zerargui. 2002. Response of durum wheat cultivars to Algerian environments. II. Adaptatives traits. *J. Agric. Environ. Int. Develop.*, **96** : 189-208.
- Araus, J.L., G.A. Slafer, M.P. Reynolds & C. Royo. 2002. Plant breeding and water relations in C₃ cereals. What should we breed for ? *Ann. Bot.* **89** : 925-940.
- Villegas D., Aparicio, N., Garcia del Moral, L.F., EL Hani S., Rharrabti Y., Ferrio, I.P. & Royo C., 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in *durum* wheat under Mediterranean conditions *Crop Sci.*, **43** : 170-180.
- Atlin G.N., K.B. McRaem and X. Lu, 2000. Genotype x Region interaction for two–row barley yield in Canada. *Crop Sci.*, **40** :1-6.

-
- Atlin, G.N., K.B. McRaem & X. Lu, 2000. Genotype x Region interaction for two-row barley in Canada. *Crop Sci.*, **40** : 1-6.
- Bahlouli F., H. Bouzerzour , A. Benmahammed & K.S. Hassous. 2005. Selection of high yielding and risk efficient Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Pak. J. Agro.*, **4** :360-365.
- Balota M., Payne W.A., Evett S.R, & Lazar M.D. 2007. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat. *Trans. ASAE* : **45(3)**, 775-780.
- Basford, K.E. & M. Cooper 1998. Genotype X environment interactions and some considerations for wheat breeding in Australia. *Aust. J. Agric. Res.* **49** : 153-174.
- Becker, H.C. & Léon J., 1988. Stability analysis in a plant breeding. *Plant Breed*, **101** : 1-23.
- Bedrani, S. & Gerard, M. 2004. Analyses sectorielles et nationales : Agriculture et politiques agro-alimentaires. p.139-172.
- Belkherchouche, H., S. Fellah, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, & N. Chellal. 2009. Vigueur de la croissance, translocation et rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* .Desf.) sous conditions semi-arides. *Courrier du savoir scientifique et technique, Université Mohamed Khider Biskra*, **9** : 17-24.
- Benmahammed A., A. Djekoun, H. Bouzerzour, & KL Hassous 2005. Genotype x year interaction of barley (*Hordeum vulgare* L.) and its relationship with plant height, earliness and climatic factors under semi-arid growth conditions. *Dirassat Journal of Agricultural Sciences, Jordan Univ.* **32**: 239-247
- Benmahammed, A., Kribaa, M., Bouzerzour, H. & Djekoun, A., 2010. Assessment of stress tolerate in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semi-arid conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Euphytica*. **17 2** (3) : 383-394.
- Blum, A. & Y. Pnuel, 1990. Physiological attributes associations with drought resistance of wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.*, **42** : 799-810.
- Blum, A. 1988. Plant breeding for stress environments. *CRC, Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA*, 223p.
- Borrell, A.K., Incoll, L.D. & Dalling, M.J., 1993. The influence of the Rht1 and Rht2 alleles on the deposition and use of stem reserve in wheat. *Ann. Bot.*, **71** : 317-329.
- Bouslama, M. & W.T. Schapaugh. 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1 : evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Sci.* **24** : 933–937.
- Bouthiba, A., P. Debaeke & S.A. Hamoudi. 2006. Varietal differences in the response of durum wheat (*Triticum turgidum*, L. var. durum) to irrigation strategies in a semi-arid of Algeria. *Rev .Irr. Sci.* : **26** : 239-251.
- Bouzerzour H. & M. Dekhili, 1995. Heritability, gains from selection and genetic correlation of grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crop Res.* **41** : 173-178.
- Bouzerzour H., & A. Djekoun. 1996. Variabilité des rendements de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi aride d'altitude. I. Interaction génotype lieu. *Revue des Sciences et Technologie Université de Constantine*, **7** : 16-18.
-

- Bouzerzour H., & Benmahammed, A., Mekhlouf A. & Harzallah D. 1998. Evaluation de quelques techniques de sélection pour la tolérance au stress chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride d'altitude. *Céréaliculture*. **33** : 27-33.
- Bouzerzour, H. & Benmahammed, A. 2009. Variation in early growth, canopy temperature, translocation and yield of four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid conditions. *Jor. J. Agricultural Sci.* **5** : 142-154.
- Boyer, J.S., 1976. Water deficit and photosynthesis : In water deficit and plant growth (*Kozlowski, T.T., Ed.*). *Academic press*, London. 153-190.
- Brancourt-Hulmel, M. & C. Lecombe., 2003. Effet of environmental varieties on genotypes environmental interaction of winter wheat : A comparison of bioadditive factorial regression to AMMI. *Crop Sci.*, **43** : 608-617.
- Brancourt-Hulmel, M., C. Lecomte & J.M. Meynard. 1999. A diagnostic of yield limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials. *Crop Sci.* **39** :1798–1808.
- Brancourt-Hulmel, M., E. Heumez, P. Pluchard, D. Beghin, C. Depatureaux, A. Giraud & J. Le Gouis. 2005. Indirect versus direct selection of winter wheat for Low-input or High-input levels. *Crop Sci.*, **45** : 1427-1431.
- Ceccarelli, S., Grando, S. #Impiglia, A. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, **103** : 307-318.
- Chennafi H., A. Aidaoui, H. Bouzerzour & A. Saci, 2006. Yield response for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci.*, **5**: 854-860.
- Chennafi, H., Bouzerzour, H. & Aidaoui, A. 2008. Positionnement des exigences en eau de la culture du blé avec l'avènement du déficit climatique en milieu semi-aride des Hautes Plaines Setifiennes (Algérie). In : Proceedings of the 5th international conference on land degradation. Valenzanos, Bari, Italy. 18-22 Septembre 2008, p 56-62.
- Clarke, J.M., R.M. Depauw & T.F. Townley-Smith. 1992. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci*, **32** :723-728.
- Condon A. G., R. A. Richards, G.J. Rebetzke and G.D. Farquhar, 2004. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Botany*, **55**: 2447-2460.
- Condon A.G., R. A. Richards, G.J. Rebetzke and G.D. Farquhar, 2002. The effect of variation in soil water availability, vapour pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon discrimination in wheat. *Aust. J. Agri. Res.*, **43** : 35-947.
- Condon A.G., R.A. Richards & G.D. Farquhar, 1987. Carbon isotope discrimination is positively correlated with grain yield and dry matter production in field-grown wheat. *Crop Sci.***27**: 996-1001.
- Condon, A.G., R.A. Richards, G.J. Rebetzke & G.D. Farquhar, 2004. Breeding for high water use efficiency. *J. Exp. Bot.*, **55** : 2447-2460.
- Cooper, M. & Fox, P. N., 1996. Environmental characterization based on probe and reference genotypes. In : Cooper, M.& Hammer, G.L. (*Eds*). Plant adaptation and crop improvement, CAB, International in association with IRRI & ICRISAT, Wallingford, pp 529-547.

-
- Cornelius, P.L., M. Seyedsadr & J. Crossa. 1992. Using the shifted multiplicative model to search for “separability” in crop cultivar trials. *Theor. Appl. Genet.* **84** :161–172.
- Craufurd, P. Q., R. B. Austin, E. Acevedo & M.A. Hall, 1991. Carbon isotope discrimination and grain yield in barley. *Field Crop Res.*, **27** : 303-313.
- CropStat, 7.2.3. 2009. Software package for windows, International Rice Research Institute, IRRI, Manilla.
- Crossa, J., 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* **44** : 55-85.
- Daniels, R. W., Alcock, M. B. & Scaribrick, D.H. 1982. A reappraisal of stem reserve contribution to grain yield in spring barley (*Hordium vulgare* L.). *J. Agri. Sci.* **98** : 347-355.
- DeLacy, I. H., Basford, K. E., Cooper, M., Bull, G.K. & Mc Loren, C. G. 1996. Analysis of multienvironment data. An historical perspective. In : M. Cooper & G.L. Hammer, Eds. Plant adaptation and crop improvement, pp.39-124, Wallingford, U.K., CABI.
- Delgado M.I., M.P. Reynolds, A. Larque- Saaavedra & S.T. Nava, 1994. Genetic diversity for photosynthesis in wheat yield under heat-stressed field environments and its relationship to productivity. Wheat Special Report, 30. CIMMYT, Mexico, DF.
- Dodig, D., Zonic, M., Mitic, N., Nikolic, R. & Surlan-Mornirovic, G. 2008. Tissue culture and agronomic traits relationship in wheat. *Plant cell, tissue and organ culture*, **95** (1) : 107-114.
- Ebdon J.S & H.G. Gauch, 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf grass performance trials: I. Interpretation of genotype x environment interaction. *Crop Sci.*, **41**: 19-23.
- Ebdon J.S., A. M. Petrovevic, & T.E. Dawson, 1998. Relationship between carbon isotope discrimination, water-use efficiency and evapotranspiration in Kentucky bluegrass. *Crop Sci.* **38**: 157-162.
- Eberhart, S.A & Russel, W.A., 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop. Sci.*, **6** : 36-40.
- Ehdaie, B., G.A. Alloush, M. A. Madore & J.G. Waines, 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat : I. Postanthesis changes in internote dry matter. *Crop Sci.* **46** : 735-746.
- Epinat–le Signor, C., S. Dousse, J. Iorgeou, J.B. Denis, R. Bonhomme, P. Carolo & A. Charcosset. 2001. Interpretation of genotype x environment interaction for early maize hybrid over 12 years. *Crop Sci.*, **41** : 663-669.
- Eskridge K.M., 1990. Selection of stable cultivars using a safety-first rule. *Crop Sci.* **30**: 36-40.
- Evans, L.T., Birgham, J., Jackson, P. & Sutherland, J. 1972. Effect of awns drought on the supply of photosynthesis and its distribution within wheat. *Ann. Appl. Biol.*, **70** : 67-76.
- FAO, 2005. Base de données agricoles de l’OCDE : Edition 2005, I. Bases de données des perspectives des produits agricoles de l’OCDE et de la FAO, 1970-2014. pp.1-50.
- FAO, 2007. Global cereal supply and demand brief crop prospects and food situation. N°3.
-

- Farquhar G.D. & R.A. Richards, 1984. Isotope composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.*, **11** : 539-552.
- Fellah A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, & A. Djekoun, 2002. Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*T. durum* Desf.). *Actes de l'IAV Hassan II*, **64**: 35-42
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In : Kuo, C.G. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, Publication, Tainan, Taiwan*.
- Finaly, K.W. & Wilkinson, G.N., 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.*, **14** : 742-754.
- Fischer, R.A. & Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, **29** : 897-912.
- Fordyce, J.A. 2006. The evolutionary consequences of ecological interactions mediated through phenotypic plasticity. *The Journal of Experimental Biology*, **209** : 2377-2383.
- Gallagher, J.N., Biscoe P.V. & Hunter B., 1976. Effects of drought on grain growth. *Nature*, **264** : 541-542.
- Garland, T. & S. A. Kelly. 2006. Phenotypic plasticity and experimental evaluation. *J. Exp. Biol.*, **209** : 2344-2361.
- Gate, P., 1995. Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture. Ed. Tec Doc., Lavoisier Cachan. 417p.
- Gate, P., L. Vignier, B. Vadon, O. Souici, D. Minkov, A. Lafarga & M. Zairi, 1997. Céréales en milieu méditerranéen. Un modèle pour limiter les risques climatiques. Perspectives agricoles. 217 : 59-70.
- Gauch, H.G. & R.W. Zobel. 1996. AMMI analysis of yield trials. p.85-122. In : M.S. Kang and H. G. Gauch. (Ed.). Genotype by environment interaction. Boca raton. C.R.C. Press., Fl. 416p.
- Gauch, H.G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46 : 1488-1500.
- Gavuzzi, P., F. Rizza, M. Palumbo, R.G. Campaline, G.L. Ricciardi & B. Borghi. 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Can. J. Plant Sci.*, **77** : 523-531.
- Haddad, L. 2009. Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, Dept. Agron, Faculté des Sciences, Univ. Ferhat ABBAS, Sétif. 70p.
- Hafsi, M., 2001. Adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions des hautes plaines sétifiennes. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences. Faculté des Sciences, UFAS, Sétif, Algérie, 80p.
- Hammer, G., Porter, J. R., Sinclair, T. R. & Kropff, M.J. In : Book of proceedings : 2nd International Symposium Modelling Crossing Systems, Florence : 16-18 July 2001/M. Bindi, M. Donatelli, J. R. Porter & M. K. van Liersum. Florence. European Society for Agronomy. 2001. pp.3-4.

-
- Hargas, H. 2002. Caractères adaptatifs et stabilité des rendements en grain du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Thèse de Magister, INA, El Harrach, Alger. 70p.
- Hervieu, B., Capone, R. & Abis, S. 2006. L'enjeu céréalier en méditerranée. Les notes d'analyse du CIHEAM N°9, pp.1-13.
- Hossain, A.B.S., AG. Sears, T.S. Cox, G.M. Paulsen. 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Sci.*, 30: 622–627..
- Kadi Z.,F. Adjel, & H. Bouzerzour, 2010. Analysis of the genotype x environment interaction of barley grain yield (*Hordeum vulgare* L.) under semi-arid conditions. *Advances in environmental biology*, 4 (1) : 34-40.
- Kang M.S. 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. *Agronomy Journal*. 85 :754–757.
- 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.
- Kribaa M., Hallaire S., & Curmi J., 2001. Effects of tillage methods on soil hydraulic conductivity and durum wheat grain in semi-arid area. *Soil and tillage Res.*, 37 : 17-28.
- Lecomte, C., Jouffroy, M.H. & Rolland, B. 2002. Screening variétal des intrants et diagnostic agronomique des facteurs limitants. Contrat de branche GIE, Club 5-INRA-ITCF. Itinéraires techniques adaptés aux variétés rustiques de blé tendre. Rapport d'étape.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. I-Chilling, freezing and high temperature. Academic Press., New York, USA, 607p.
- Levitt, J. 1982. Water stress. In : " Responses of plant to environmental stress, water radiation, salt and other stress" . New York Academic Press : 25-285.
- Lin, C.S. & Binns, M.R., 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can. J. Plant Sci.*, 68 :193–198.
- Lin, C.S., Binns, M.R. & Lefkovitch L.P., 1986. Stability analysis : Where do we stand ? *Crop Sci.*, 26 : 894-900.
- Loss, S.P. & K.H.M. Siddique. 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environment. *Adv. Agro.*, 52 : pp. 229-276 .
- Ludlow, M.M., R.C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 43 :107–153.
- MADR. 2007. Données statistiques du Ministère de l'Agriculture. Bureau des statistiques.
- Mc Intosh, M.S., 1983. Analysis of combined experiments. *Agron. J.*, 75 : 153-155.
- 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*, 4 : 507-513.
- Mekliche, A., Bouthier, A. # Gate, P. 1993. Analyse comparative des comportements à la sécheresse du blé dur et du blé tendre. In : tolérance à la sécheresse des
-

- céréales en zone méditerranéenne, diversité génétique et amélioration variétale. Ed. Monneveux P., Ben Salem M. Les colloques, INRA, Paris. 64 : 299-310.
- Monneveux P. & This D. 1997. La génétique face aux problèmes de la tolérance des plantes cultivées : Espoirs et difficultés. *Sécheresse*, 8 : 29-37.
- Nachit, M.M., Nachit, G., Gauch, H.G. & Zobel, R.W., 1995. Use of AMMI and linear regression models to analysis genotype by environment interaction in durum wheat. *Theor. Appl Genet.*, 83 : 597-601.
- Navabi, A., R.C. Yang, J. Helm & D.M. Spaner. 2006. Can spring wheat-growing mega environments in the Northern Great Plains be dissected for representative locations or niche-adapted genotypes ? *Crop Sci.*, 46 :1107–1116.
- 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 Bousselem dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture*.
- Papadakis, J.S., 1938. *Ecologie agricole*. Ed.Jules Duculot, Gembloux, 121 : 318-323.
- Papy, P. 1979. Analyse du comportement des cultures de blé dur et d'orge dans les différentes régions céréalières du Maroc à travers leur réaction aux variations interannuelles des régions pluviométriques. *C. R. Acad. Agri., France*, 31 : 213-247.
- Passioura, J., 2004. Increasing crop productivity when water is scarce : From breeding to field management. In proceedings of the 4th International Crop Science Congress " New directions for a diverse planet " 12 Brisbane, Australia, 12 pages.www.regional.org-au/cs
- Paulsen, G. M. & Heyne, E. G., 1983. Grain production of winter wheat after spring freeze injury. *Agro. J.*, 75 : 105-107
- Pinter, Jr. P.J., G. Zipoli, R.J. Reginato, R.D. Jackson & S.B. Idso, 1990. Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agric. Water Manag.*, 18: 35–48.
- Rebetzke, G.J., Richards R. A., Fettel, N. A., Long, M., Condon, A.G., Forrester, R.I. & Botwright. 2007. Genotypic increases in coleoptiles length improves stand establishment, vigour and grain yield of deep-sown wheat field. *Crops Res.* 154 : 409-425.
- Rebetzke, G.J., A.G. Condon, R. A. Richards & G.D. Farquhar, 2002. Selection for reduced carbon isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rain fed bread wheat. *Crop Sci.*, 42 : 739-745
- Rebetzke, G.J., Condon A.G., Richards R.A. & Farquhar G.D. 2002. Selection for reduced carbon isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Sci.* 42 : 739-745.
- Reynolds, M. P., Trethowan, R.M., Crossa, J. & Sayre, K.D., 2002. Physiological factors associated with genotype by environment interaction in wheat. *Field Crop Res.*, 75 : 139-160.
- Reynolds, M. P., A. Muzeeb-Kazi & M. Sawkins. 2005. Prospects for utilising plant-adaptative mechanism to improve wheat and other crops in drought and salinity-prone environments. *Annal. Appl. Bio.*, 146 : 239-259.

-
- Richard, R.A., Rebetzke, G.I., Condon, A.G. & Van Herwaat-Den, A. F., 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of use and crop yield in temperate cereals. *Crop. Sci.*, 42 : 111-121
- Richards, R.A., Walt, M. & Rebetzke G.J. 2007. Physiological traits and cereal germoplasm for sustainable agricultural systems. *Euphytica*. 154 : 409-425.
- Rose, L.W., M.K. Das & C.M. Taliaferro. 2008. A comparison of dry matter yield stability assessment methods for small numbers of genotypes of Bermuda grass. *Euphytica*, 164 :19–25.
- Roseille A.A. & J. Hamblin, 1981.Theoretical aspect of selection for yield in stress and non stress environments. *Crop Sci.*, 21: 923-932.
- Sabaghnia N, H. Dehghani & S.H. Sabaghpour. 2006. Nonparametric methods for interpreting GxE interaction of lentil genotypes. *Crop Sci.*, 46 : 1100–1106.
- Safi A.,2010. Mémoire de Magister, Faculté des Sciences Agro-Vétérinaires, Dept. d'Agronomie, Université Saad Dahlab, Blida, p.
- Samonte, S.O.P.B., L.T. Wilson, A.M., Mc clung & J.C. Medley. 2005. Targeting cultivars on rice growing environment using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop. Sci.* 45 : 2414-2424.
- Samonte, S.O.PB., L.T. Wilson, R. E. Tabien A.M. & Mc clung. Use of gross income as a measure of productivity rice breeding. *Can. J. Plant Sci.* 88 : 1015-1022.
- Sayre, K. D., Acevedo, E. # Austin, R.B. 1995. Carbon isotope discrimination and grain yield for three bread wheat germoplasm groups grown at different levels of water stress. *Field Crops Res.*, 41 : 45-54.
- Siddique, K.H.M., Belford, D. & Tennant, D. 1990. Root/shoot ratio of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in Mediterranean environment. *Plant soil*, 121 : 89-98.
- Siddique, K.H.M., Belford, M.W., Perry, D. & Tennant D., 1989. Growth development and light interception of old and modern wheat varieties in Mediterranean environment. *Aust. J. Agro. Res.*, 40 : 473-487.
- Sinebo, W. 2005. Trade of between yield increase and yield stability in three decades of barley breeding in a tropical high land environment. *Field Crop Res.* 92 : 35-52.
- Singh, S D., S. Grando & S. Ceccarelli. 2006. Measures of repeatability of genotype by location interactions using data from barley trials in Northern Syria. *Exp.Agri.*, 42 : 189-198.
- Sio-Se Mardeh, A., A. Ahmadi, K. Poustini, V. Mohammadi. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions *Field Crops Research*, 98: 222-229
- Slafer, G.A., J.L. Araus, C. Royo & L.F.G. Del Moral, 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Ann. Appl. Biol.* 146 : 61-70.
- Statitcf, 1993. Logistiel de statistique. Version 5.0, Edition ITCF.
- Stats 4U, 2007. Free Software package, version 1, release 2, Rev.2, written by William G. Miller.
-

- Steel, G.D.S. & J.H. Torrie, 1980. Principles and procedures of statistics : A Biometrical Approach (Eds), Mc Graw Hill Book company, N.Y., 663p.
- Tardieu F. 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. Trends in Plant Science, 8 : 9-14.
- USDA-Canada. Grains-council, Grain Market Report, GMR, N° 391. 2009.
- Van Eeuwijk, F. A., Malosetti , M., Yin, X., Struik, P.C. & Stam, P. 2004. Modelling differential phenotypic expression. In : "New discussion for diverse plants". Proceedings of 4th International Crop Science Congress, 26 Sept.-1 Oct.2004. Brisbane, Australia.
- Vargas, M., J. Crossa, F.A. van Eeuwijk, M.E. Ramirez & K. Sayre. 1999. Using Partial least squares regression, factorial regression and AMMI models for interpreting genotype by environment interaction. Crop Sci., 39 : 955-967.
- Voltas, J., I. Romagosa, A. Lafarga, A.P. Armesto, A. Sombrero & J.L. Araus.1999. Genotype by environment interaction for grain yield and carbon isotope discrimination of barley in Spain. Aust. J. Agri .Res. 50 : 1263-1271.
- Voltas, J., Lopes-corcoles, H., Borrás, G. 2005. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. Eur. J. Agron. 22 : 309-324.
- Worldlaw, I.F & Moncur L., 1995. The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. Aust J. Plant physiol., 22 : 391-397.
- Witcombe J.R., & D.S. Virk, 2009. Methodologies for generating variability. Part 2 : Selection of parents and crossing strategies. In : Plant breeding and farmer participation. Ceccarelli, S.(Ed.) Guimares, E P.(Ed.) Welzein, E./ FAO, Rome (Italy) ; International Crop Research Inst.for the Semi-Arid Tropics, Patanchcheru (India) ; International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Aleppo (Syria). Pp.129-138.
- Wricke, G., 1962. Urbet eine methods Zar Erfassung der Ökologischen Streubreite in Field versuchen. Z.Pflanzen Zücht, 47 : 92-96.
- [Www.fast.usda.gov/pecad/highs/2005/durum2005/durum%20tables.htm](http://www.fast.usda.gov/pecad/highs/2005/durum2005/durum%20tables.htm).
- Xu H.L., F. Qin, F. Du, R. Xu & C. Tian.Z.S. (1009). Photosynthesis in different parts of wheat plant. J.of Food, Agri. & Environment. 7 : 399-404.
- Yan, W. & L. A. Hunt, 2001. Interpretation of genotype by environment interaction for winter wheat in Ontario. Crop. Sci., 41 : 19-25.
- Yan, W., Agrama, H., Fjellstrom, R.G., Bryant, R.J. & Mc Clung, A.M. 2008. Characterization of the USDA Rice world gene bank using a core collection strategy : In : Proceedings of the 32nd Rice Technological Working Group Meetings, February, 18-21, 2008. San Diego, C.A. 2008. CDROM.
- Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng & Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Sci., 40 : 597-605.
- Yau, S. K. & Hamblin, J. 1994. Relative yield as a measure of entry performance in variable environments. Crop. Sci., 34 : 813-817.

Yau, S. K., M.M. Nachit, J. Ryan and J. Hamblin.1995. Phenotypic variation of Boron-toxicity tolerance in durum wheat at seedling stage. *Euphytica*, 83 : 185-191.

Zobel, R.W., M.J. Wrigh, H.G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.*, 80 : 388–393.

Annexe

Table des matières

- 1. Introduction
- 2. Matériel et Méthodes
- 3. Résultats
- 4. Discussion
- 5. Conclusion
- 6. Bibliographie
- 7. Annexes