

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences Agrovétérinaires et biologiques**

Département des Sciences Agronomiques

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Amélioration des productions végétales

**ANALYSE DIALLELE DE QUELQUES CARACTERES ASSOCIES A  
L'ADAPTATION DU BLE DUR (*Triticum durum* Desf.) AU CLIMAT  
SEMI-ARIDE**

Par

**Abderrahmane HANNACHI**

Devant le jury composé de :

M. BENMOUSSA	Professeur, U.S.D. Blida	Président
A. BOUTEKRABT	Professeur, U.S.D. Blida	Promoteur
H. BOUZERZOUR	Professeur, U.F.A. Sétif	Co-promoteur
A. BENMAHAMMED	Professeur, U.F.A. Sétif	Examineur
A. BENBELKACEM	Maître de recherche A, INRAA	Examineur

Blida, Avril 2013

## RESUME

La présente étude a été réalisée au niveau de la station expérimentale agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif durant les campagnes agricoles 2010/2011 et 2011/2012. L'objectif de cette étude est l'identification du potentiel génétique de six (6) parents et leurs hybrides F1 dans un dispositif de croisement en demi diallèle (6X6) selon la méthode 2 du model 1 de Griffing. Les résultats obtenus révèlent une grande variabilité génétique entre les parents pour l'ensemble des caractères étudiés. Parmi les six parents, le génotype (gaviota/durum) a présenté la meilleure performance moyenne pour le rendement grains (36.29 g/plant). Toutefois, l'hybride Ofanto X (gaviota/durum) (4X5) démontre une supériorité pour ce caractère (34.05 g/plant). Les carrés moyens dus à l'AGC et à l'ASC sont significatifs à hautement significatifs pour la majorité des caractères mesurés. L'analyse de l'aptitude à la combinaison a révélé la présence d'une grande magnitude des variances de l'AGC et de l'ASC pour l'ensemble des caractères étudiés. Le rapport AGC/ ASC est supérieur à l'unité montrant la prédominance des effets additifs dans l'expression de la majorité des caractères. Néanmoins, certains caractères comme la biomasse totale, le rendement grain, le poids des épis et le nombre d'épis par plant sont contrôlés par des effets géniques non-additifs avec des valeurs de 0.78, 0.66, 0.50 et 0.83 respectivement. L'étude de l'héritabilité au sens large a montré des valeurs moyenne à fortes pour tous les caractères étudiés hormis la TRE (0.18). Pour l'héritabilité au sens étroit, les valeurs sont moyennes à élevées à l'exception de la Biomasse, le rendement grain, le Poids des épis et le nombre d'épis. Donc la sélection des parents désirables et des combinaisons de gènes pour ces caractères peut être effective pour promouvoir un programme de sélection. Ainsi, la sélection pour le rendement grain et ses composantes doit être envisagée durant les générations ultérieures. Des valeurs significatives de l'hétérosis par rapport au parent moyen et au meilleur parent ont été révélées chez les hybrides étudiés mais leurs magnitudes sont généralement faibles. Toutefois, l'hybride 1X2 montre des valeurs élevées pour la majorité des caractères étudiés. Aussi, les hybrides 1X4, 2X5 et 4X5 ont réalisés des effets positifs pour le NGE. De même, les croisements 2X6 et 4X6 ont exhibés de fortes valeurs de l'hétérosis par rapport

au parent moyen pour l'indice de récolte. Le croisement 1X6 a démontré également des valeurs positives de l'hétérosis par rapport au parent moyen pour le rendement grains et le poids des épis (50.52 et 39.16% respectivement).

Mot clés

blé dur, croisement diallèle, AGC, ASC, hétérosis, semi-aride

## ABSTRACT

The present study was conducted at the experimental site of ITGC (Technical Institute of Field Crops) station of Setif, during 2010/2011 and 2011/2012 cropping years. The objective of this study is the identification of the genetic potential of six genotypes and their hybrids F1 in half diallel cross (6X6) following the method 2 and model 1 of Griffing. Results revealed a large range of variability among parents for all the traits under study. Among the six parents, (gaviota/durum) genotype presented the best mean performance for grains yield (36.29 g/plant). However, the hybrid Ofanto X (gaviota/durum) (4X5) shows superiority for this trait (34.05 g/plant). Mean squares due to GCA and SCA were significant at highly significant for the majority of the characters measured. Combining ability analysis revealed the presence of a large magnitude of variances due to GCA and SCA for the whole of the studied characters. The AGC/ASC ratio is higher than unit showing the prevalence of the additive effects for the majority of traits. Nevertheless, certain characters like total biomass, grain yield, spikes weight and number of spikes per plant are controlled by not-additives gene effects (0.78, 0.66, 0.50 and 0.83 respectively). Broad sense heritability study showed moderate to strong values for all the characters studied except for TRE (0.18). Similarly, narrow sense heritability showed modest to high values except for Biomass per plant, Yield per plant, spikes weight and number of spikes per plant. So, selection of desirable parents and gene combinations for these characters can be effective to promote breeding programme. Thus, selection for grain yield and yield related traits will be considered during the later generations. Significant values of heterosis and heterobeltiosis were revealed in hybrids but their magnitudes are generally low. However, hybrid 1X2 shows high values for the majority of traits understudy. Also, hybrids 1X4, 2X5 and 4X5 carried out positive effects for NGE. In the same way, crosses 2X6 and 4X6 exhibited strong values of heterosis for harvest index. 1X6 cross also, showed positive values of heterosis for grain yield and spikes weight (50.52 and 39.16% respectively).

### Key words

durum wheat, diallel cross, GCA, SCA, heterosis, semi-aride

## ملخص

أجريت الدراسة على مستوى محطة التجارب الزراعية للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى بسطيف (ITGC) خلال الموسمين الزراعيين 2011/2010 و 2012/2011. تهدف التجربة الى تحديد القدرة الوراثية لستة (6) أصناف من القمح الصلب و هجائها من الجيل الأول ( $F_1$ ) باستعمال تحليل الهجن التبادلية في اتجاه واحد (half-diallel) حسب الطريقة 2 من النموذج 1 Griffing. أظهرت النتائج المتحصل عليها على وجود تباين وراثي كبير بين الأصناف لدى أغلبية الصفات المدروسة. أظهر الصنف (gaviota/durum) من بين الأصناف الستة، أحسن قدرة متوسطة بالنسبة للمردود الحبي (36.29 غ/نبته). في حين أبرز الهجين (4X5) (gaviota/durum) Ofanto X تفوقه لدى نفس الصفة (34.05 غ/نبته). كانت متوسطات المربعات الناشئة عن القدرتين العامة (AGC) و الخاصة (ASC) على التآلف ذات معنوية عالية إلى حد عالية بالنسبة لغالبية الصفات المدروسة. أظهر تحليل القدرة على التآلف على وجود فروق كبيرة ل AGC و ASC لدى معظم الخصائص المدروسة. كانت النسبة AGC/ASC أكبر من الوحدة مبينة سيادة الفعل الجيني المضيف في تعبير أغلبية الصفات. غير أن بعض الصفات مثل الكتلة الإحيائية، المردود الحبي، وزن السنابل، عدد السنابل في النبات كانت تحت تأثير الفعل الجيني غير المضيف بقيم 0.78، 0.66، 0.50 و 0.83 على التوالي. أظهرت دراسة درجة التوريث بمفهومها الواسع قيما من متوسطة إلى كبيرة لدى جميع الخصائص المدروسة باستثناء المحتوى النسبي للماء (0.18). اما بالنسبة لدرجة التوريث بمفهومها الضيق فباستثناء الكتلة الإحيائية، المردود الحبي، وزن السنابل و عدد السنابل في النبات الواحد فان النتائج كانت من متوسطة إلى كبيرة و بالتالي فان اختيار الآباء المرغوب فيهم و أحسن الارتباطات الجينية بالنسبة لهذه الصفات يمكن أن يكون فعليا بهدف ترقية برنامج انتخاب. فالانتخاب بالنسبة للمردود و مكوناته يجب أن يكون خلال الأجيال اللاحقة. بينت النتائج أيضا قيما معنوية لقوة الهجين مقارنة بالقيمة المتوسطة و أفضل قيمة للآباء غير أن هذه القيم كانت ضعيفة على العموم. إلا أن الهجين 1X2 أظهر قيما عالية بالنسبة لمعظم الصفات المدروسة. كما حقق الهجاء 1X4، 2X5 و 4X5 تأثيرات موجبة لدى عدد الحبات في السنبل. كما أحرز الهجينين 2X6 و 4X6 قيما ذات دلالة معنوية جد مرتفعة لقوة الهجين مقارنة بالقيمة المتوسطة للآباء بالنسبة لمؤشر الحصاد. بين الهجين 1X6 أيضا قيما موجبة لقوة الهجين مقارنة بالقيمة المتوسطة للآباء بالنسبة للمردود الحبي و وزن السنابل (50.52 و 39.16% على التوالي).

### الكلمات المفتاحية

قمح صلب، التهجين النصف دائري، AGC،ASC، قوة الهجين، شبه جاف.

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et qui m'a inspiré les bons pas et les justes réflexes, sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que j'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur BOUZEROUR Hamenna Professeur à l'Université de Sétif et à monsieur BOUTEKRABT AMMAR Professeur à l'Université Saad DAHLAB de Blida qui ont accepté de diriger ce travail, ils ont fait preuve d'une grande patience et qui ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce travail, leurs conseils, leurs orientations, leurs disponibilités ainsi que leurs soutiens moral et scientifique m'ont permis de mener à terme ce projet. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et ma sincère gratitude.

Mes vifs remerciements vont également à :

Monsieur BENMOUSSA Mebrouk Professeur à l'Université de Blida, d'avoir accepté de présider le jury.

Monsieur BENMAHAMMED Amar Professeur à l'Université de Sétif d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Monsieur BENBELKACEM Abdelkader Maître de recherche A à l'INRAA d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier également tous mes enseignants du magister.

Je remercie tous mes collègues de magistère Zohra DJAIDJAA, Sonia DAHMANI, Zine El Abidine FELLAHI, Yacine NAIMI et Slimane AYADA.

Je remercie le directeur et tout le personnel de la station ITGC de Sétif notamment Mahfoud MAKHLOUF et Hocine ZERARGUI pour leurs aides précieuses.

Je remercie le Dr Kamel FELIACHI pour ses encouragements.

Je remercie également tous mes collègues de l'INRAA et particulièrement ceux de l'unité de Sétif qui m'ont aidé et encouragé pour l'accomplissement de ce projet.

Je remercie tous les membres de ma famille ma mère, mes frères et en particulier ma femme Karima et ma petite Yasmine pour le soutien qu'ils m'ont apporté, pour leur encouragement, patience et gentillesse.

En fin, je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCIEMENTS.....	5
TABLE DES MATIERES.....	7
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	9
INTRODUCTION.....	11
1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	13
1.1. Origines génétiques et géographiques du blé dur ( <i>Triticum durum</i> Desf.)...	13
1.2. Importance du blé dur ( <i>Triticum durum</i> Desf.).....	16
1.3. Les contraintes de la production du blé dur.....	18
1.4. Sélection pour l'adaptation et la performance.....	21
1.5. L'analyse Diallèle.....	33
2. MATERIEL ET METHODES.....	37
2.1 Le site expérimental.....	37
2.2 Le matériel végétal.....	37
2.3 Caractères mesurés.....	39
2.4 Analyse des données.....	42
2.5 L'héritabilité.....	47
2.6 Estimation de l'hétérosis.....	47
3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	49
3.1 Climat des campagnes d'étude.....	49
3.2 Analyse génétique.....	50
3.3 Coefficients de variation phénotypique et génotypique, composantes de la variance et l'héritabilité.....	73
3.4 Etude de l'hétérosis.....	75
DISCUSSION GENERALE .....	81
CONCLUSION.....	84

REFERENCES.....	85
APPENDICES.....	101
A. Liste des symboles et des abréviations.....	101
B. Publications.....	104

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 :	Région du croissant fertile, origine géographique des blés.....	13
Figure1. 2 :	Origine génétique du blé.....	15
Figure1. 3 :	Egrenage caractéristique des espèces de blés et de leurs apparentés ( <i>Aegilops taushii</i> ).....	15
Figure1. 4 :	Productions et rendements du blé dur algérien de la période 2000-2010.....	17
Figure1. 5 :	Le grain du blé dur.....	18
Figure 3.1 :	Répartition de température et la pluviométrie durant deux campagnes et les moyennes sur 20 ans.....	49
Figure 3.2 :	Relation entre les valeurs arbitraires de la chlorophylle mesurées avec le SPAD et le CCI chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	52
Figure 3.3:	Relation entre les valeurs moyennes de la hauteur de la plante et la longueur du col de l'épi chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	54
Figure 3.4 :	Valeurs du col et de l'extrusion en fonction de celles de la hauteur de la plante chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	55
Figure 3.5 :	Relation entre la biomasse aérienne et la paille produites par plante chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	58
Figure 3.6 :	Relation entre la paille produite et l'indice de récolte chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	58
Figure 3.7 :	Relation entre le nombre d'épis et le poids des épis produit par plante chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	60
Figure 3.8 :	Relation entre le poids des épis et le rendement grain par plante chez les parents et les hybrides F <sub>1</sub> .....	61
Figure 3.9 :	Relation entre la précocité au stade épiaison de l'hybride et celle du parent moyen.....	76
Figure 3.10 :	Relation entre la précocité au stade épiaison de l'hybride et celle du parent moyen.....	78
Tableau 2.1:	Randomisation en plein champs des géniteurs de blé dur et	

	de leurs hybrides $F_1$ .....	39
Tableau 2.2:	Méthode II, modèle 1 de l'analyse des aptitudes générale et spécifique à la combinaison.....	44
Tableau 3.1:	Carrés moyens de l'analyse de variance des caractères mesurés chez les parents et les hybrides $F_1$ .....	51
Tableau 3.2:	Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides $F_1$ .....	53
Tableau 3.3:	Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides $F_1$ .....	57
Tableau 3.4:	Régression progressive de la biomasse aérienne, le poids des épis et le rendement grain sur les variables mesurées chez les parents et les hybrides $F_1$ .....	63
Tableau 3.5:	Carrés moyens de l'analyse de variance des aptitudes générale et spécifique à la combinaison des caractères mesurés.....	65
Tableau 3.6:	Effets de l'AGC des parents pour les variables mesurées.....	68
Tableau 3.7:	Effets de l'ASC des différents hybrides pour les caractères mesurés.....	71
Tableau 3.8:	Coefficients de corrélation du rendement de l'hybride avec les effets d'ASC des variables mesurées.....	72
Tableau 3.9:	Coefficients de variation phénotypique et génotypique, composantes de la variance et degré de l'héritabilité aux sens large et étroit des caractères mesurés.....	74
Tableau 3.10:	Hétérosis (%) par rapport au parent moyen des différents hybrides pour les variables analysées.....	77
Tableau 3.11:	Hétérosis (%) par rapport au meilleur parent des différents hybrides pour les variables analysées.....	80

## INTRODUCTION

Produire plus de céréales est devenue une question préoccupante pour l'Algérie, dont les besoins, d'une population en pleine croissance, sont estimés à plus de 100 million de quintaux vers 2020 [1]. Produire plus suppose que le milieu s'y prête et que la technologie suit. Ceci n'est pas toujours le cas de l'Algérie où les grandes zones productrices de céréales se caractérisent par un climat variable et des sols dont la fertilité est décroissante suite à des décennies d'exploitation minière [2]. Les techniques ne suivent pas toujours, suite à la prépondérance de faibles rendements. Ainsi, le rendement grain des variétés de blé dur, les plus ensemencées, telles que Hedba, Mohamed Ben Bachir, Adjini, Belioni, Djazairi et Tounsi variait de 3.5 à 10.3 q ha<sup>-1</sup>, au cours de la période 1920 à 1929 [3]. Au cours de la période 2000 -2010, il varie de 11.0 à 18.55 q ha<sup>-1</sup>, pour un itinéraire qui se limite au labour, le semis et la récolte avec peu d'engraisement, de désherbage et/ou de protection phytosanitaire [4, 5].

Avec l'avènement de la révolution verte, vers les années 1970, l'espoir était fondé sur l'utilisation des variétés à hauts rendements pour changer radicalement l'évolution de la courbe de production des céréales qui se caractérise par une forme en dents de scie [6]. Ces variétés, si en milieux favorables ou sous irrigation, elles arrivent à exprimer leur potentiel de rendement, en pluviale et sous climat semi-aride, elles se montrent plus variables et souvent aussi, sinon moins, productives que les cultivars locaux qu'elles sont censées remplacer, suite à leur sensibilité aux stress [7].

Le blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) est une culture ancestrale qui occupe une place importante dans les habitudes alimentaires de la population. Conduite en pluviale, cette culture est soumise à la variabilité climatique qui se traduit par des contraintes hydriques et thermiques erratiques, notamment dans l'étage bioclimatique semi-aride. Les risques liés aux changements climatiques et la globalisation rendent le besoin de construire une sécurité alimentaire nationale fondée sur l'augmentation continue de la production agricole locale plus que jamais nécessaire [8].

La mise en place d'un programme d'amélioration génétique des plantes pour une meilleure adaptation aux contraintes environnementales est une voie à même d'assurer la sécurité alimentaire du pays notamment pour les cultures stratégiques comme le blé dur. L'efficacité d'un tel programme d'amélioration génétique et de sélection des plantes, en termes de création de nouvelles variétés plus performantes et de production plus régulière dépend largement de la variabilité existante pour les caractères d'intérêts ciblés et de la facilité de transmission héréditaire de ces caractères entre lignées parentales. La compréhension des mécanismes génétiques qui sous-tendent les caractères d'intérêts, notamment l'action des gènes mis en cause, leur degré de détermination génétique et le fond génétique qui en assure la meilleure expression, est une importante étape en amélioration des plantes.

Des méthodes biométriques existent pour déterminer ces mécanismes dont l'information est très utile pour l'organisation du programme de croisement en vue de l'obtention d'un gain génétique le plus élevé possible. L'analyse diallele suggérée par GRIFFING [9] permet de déterminer les aptitudes à la combinaison des géniteurs et l'héritabilité des caractères ciblés par la sélection. La présente étude se fixe pour objectif d'analyser un demi diallele entre 6 parents de blé dur (*Triticum durum* Desf.) qui sont Waha, Zenati-Bouteille /Flamengo (Zb/Fg), Mexicali<sub>75</sub>, Ofanto, Gta dur (Gaviota/durum) et Guemgoum Rkhem pour les caractères morphophénologiques associés à l'adaptation au climat semi- aride.

## CHAPITRE 1

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 1.1 Origines génétiques et géographiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

La découverte du blé remonte à 15000 ans avant Jésus-Christ dans la région du croissant fertile, vaste territoire comprenant, la vallée du Jourdain et des zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie, de l'Iraq, et la bordure Ouest de l'Iran [10, 11]. C'était à une époque où l'homme pratiquait déjà la cueillette et faisait ses débuts comme agriculteur. Cette période coïncidait avec un épisode climatique sec, aboutissant à l'arrêt du mode de vie de 'chasseur-cueilleur', et engendrant la domestication progressive des plantes, associée à la création des premières communautés villageoises [11]. Des recherches archéologiques ont montré que la domestication des différentes espèces de blé par l'homme du Néolithique s'est faite à l'intérieur du centre de répartition géographique des ancêtres sauvages du blé dans la zone du croissant fertile (Figure 1.1).



Figure 1.1 : Région du croissant fertile, origine géographique des blés.

(<http://www.kidspast.com/world-history/0035b-fertile-crescent.php&h>).

L'espèce de cette époque lointaine, le *Triticum monococcum* L., est un des ancêtres des blés actuels. Le genre *Triticum*, se subdivise, en fonction du niveau de ploïdie, en trois groupes: diploïde, tétraploïde et hexaploïde, avec respectivement 14, 28 et 42 chromosomes [12,13]. Ces trois groupes sont représentés, respectivement, par *Triticum monococcum* L., *Triticum turgidum ssp durum* L. et *Triticum aestivum* L. Le génome de ces espèces est organisé en une série basique de 7 chromosomes ( $X = 7$  chromosomes), qui, au cours de l'évolution, a gardé une certaine homologie (synténie), malgré la spéciation chez la famille des *Poaceae* [14].

Les espèces de blé tirent leur origine génétique de croisements naturels entre *Triticum monococcum*, *Triticum urartu* et des espèces sauvages apparentées appartenant à *Aegilops* (*Aegilops spelloïdes*). *Triticum monococcum* et *Triticum urartu* sont les premières formes de céréales cultivées, elles sont de constitution génomique  $2n = 14$ . Ainsi, le génome A vient de *Triticum urartu*, alors que le génome B vient de l'*Aegilops spelloïdes*. Ces deux génomes, ensemble, forment la constitution génomique du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Le croisement entre l'espèce *Triticum durum* de constitution génomique AABB et l'*Aegilops tauschii* de constitution génomique DD, donna naissance à l'espèce *Triticum aestivum* de constitution génomique AABBDD [10] (Figure 1.2).

Avant la domestication, les blés sauvages se caractérisent par un épi cassant à maturité, s'auto semant directement. Cette caractéristique, bien qu'essentielle au blé sauvage en tant que mécanisme de dispersion des graines, l'égrenage de l'épi à maturité cause des pertes importantes de rendement, constituant sans doute un très grand désavantage pour les premiers cultivateurs de blé. Les graines étaient vêtus par des glumes et glumelles très dures, assurant une protection à la graine jusqu'au moment où les conditions de germination sont réunies [10]. Ces caractéristiques des blés sauvages sont encore observables aujourd'hui chez certaines espèces apparentées (Figure 1.3).

Le blé dur s'est différencié dans trois centres secondaires différents, le bassin occidental de la méditerranée, le Sud de la Russie et le proche orient. Chaque centre secondaire donna naissance à des groupes de variétés botaniques avec des caractéristiques phénologiques, morphologique

et physiologiques particulières. Ainsi, SPAGNOLETTI-ZEULI *et al.* [15] notent que les variétés botaniques d'origine algériennes, éthiopiennes et italiennes diffèrent surtout pour les dimensions de l'épi et le poids de 1000 grains en plus de la hauteur de la végétation et de la durée du cycle végétatif.

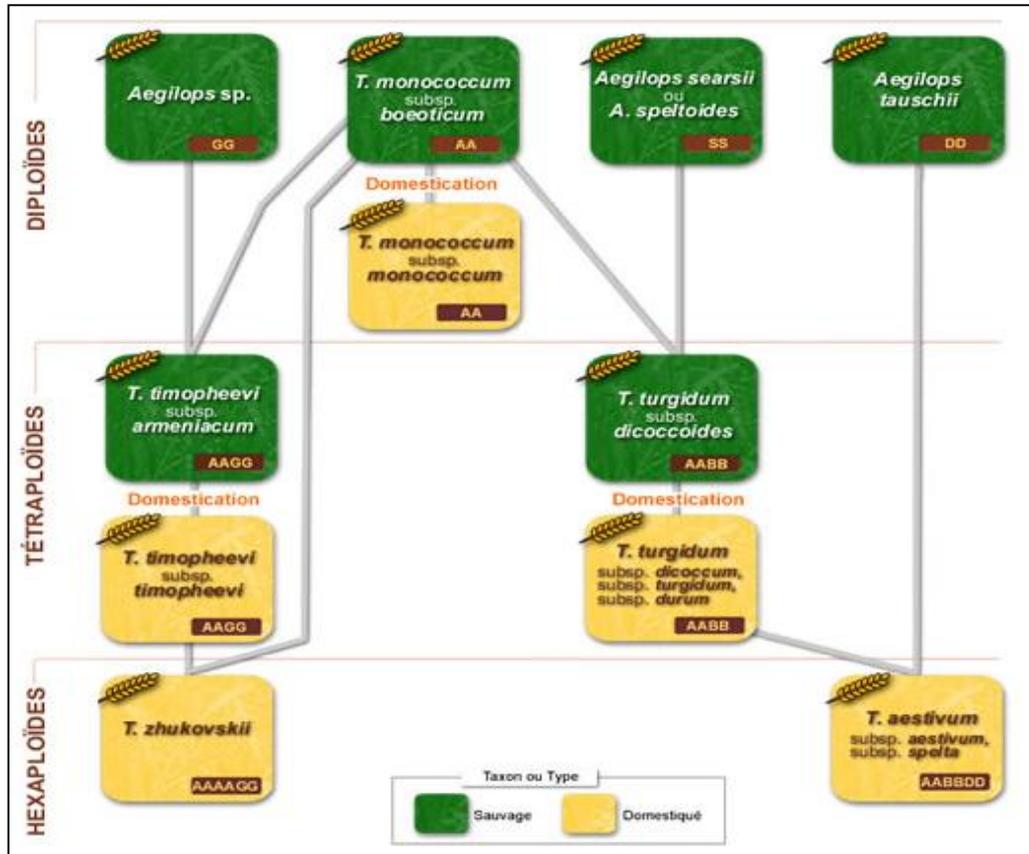


Figure1. 2 : Origine génétique du blé ([www.vulgariz.com](http://www.vulgariz.com)).



Figure1. 3 : Egrenage caractéristique de l'espèce apparentée de blé (*Aegilops tauschii*). [16]

## 1.2 Importance du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Quoique le blé tendre (*Triticum aestivum* L.), le maïs (*Zea mays* L) et le riz (*Oryza sativa* L.) soient les céréales les plus produites à travers le monde, il n'en demeure pas moins que le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une place importante dans certaines régions du monde, notamment les zones semi-arides dont le climat est de type méditerranéen [17]. Le blé dur occupe 8 à 10% du total des terres réservées aux blés dur et tendre, dans le monde. La superficie moyenne consacrée annuellement à la culture du blé dur est estimée à 18 millions d'hectares, pour une production annuelle moyenne de 37.9 millions de tonnes, moyennes de la période 2006-2010 [18].

La culture du blé dur est concentrée au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, en Russie, aux Dakotas, au Canada, l'Inde et en Europe méditerranéenne. Avec une production de 9.00 millions de tonnes par an, moyenne de la période 2006-2010, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur. Le Canada arrive au deuxième rang avec 4.8 millions de tonnes par an, suivi de la Turquie et des États-Unis, avec 1.99 et 2.67 millions de tonnes métriques respectivement. Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale [18].

En Algérie, le blé dur est une très ancienne culture traditionnelle. Sa superficie est, en moyenne, de 1.3 millions d'hectares, durant la période 2000-2010 [5]. L'importance des superficies occupée par cette espèce, comparativement à la superficie occupée par l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'état. Ces prix sont de 4500, 3500 et 2500 DA respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge. Selon HAKIMI [6], l'orge et le blé dur assuraient l'essentiel des besoins alimentaires des habitants et de leur cheptel, au cours de la période coloniale et bien avant cette dernière. A l'avènement de l'indépendance, une forte demande alimentaire se faisait sentir sur le blé dur et le blé tendre, alors que l'orge prenait une destination fourragère [6]. Actuellement, le pays se classe au premier rang mondial pour la consommation de blé avec une moyenne dépassant largement les 200 kg/hab/an, 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 [1].

La croissance démographique, le changement de modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, font que le volume des céréales consommées est en constante augmentation. Ainsi, au cours de l'année 2011, les importations, à partir de l'union européenne, sont passées de 3.98 à 5.5 millions de tonnes pour le blé tendre et de 1.24 à 1.85 millions de tonnes pour le blé dur. Ces volumes sont les plus élevés depuis l'indépendance [19]. La production du blé dur, comme celle du blé tendre, est très fluctuante. Pour la période 2000 -2010, la production de blé dur a varié de 9 à 23 millions de quintaux (Figure 1.4) [5].

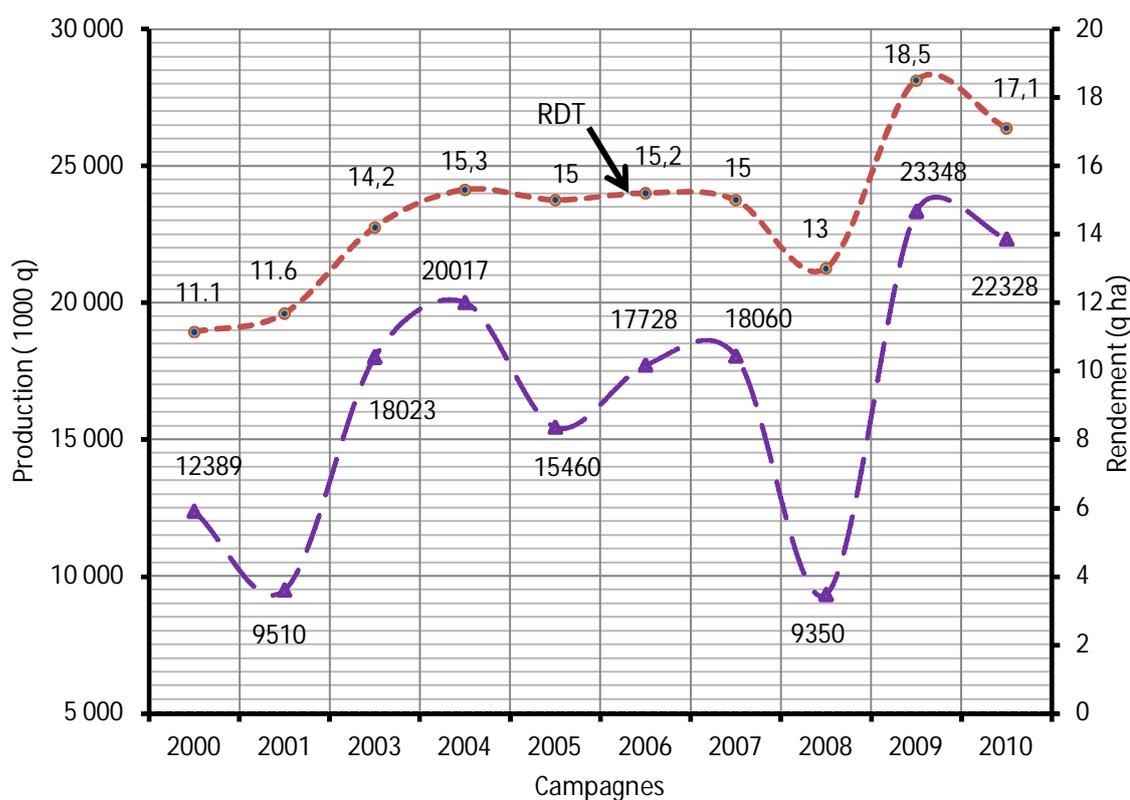


Figure1. 4 : Productions et rendements du blé dur algérien de la période 2000-2010 [5].

Cette production est loin de couvrir la demande qui est de plus en plus importante, suite au faible nombre de produits de substitution et au soutien des prix des céréales [20]. Les rendements de la céréaliculture algérienne sont très bas, comparativement à la moyenne mondiale qui est de  $29 \text{ q ha}^{-1}$ , et celles des pays voisins qui est de  $25 \text{ q ha}^{-1}$  [20]. Le rendement de blé dur, a varié de  $11.0$  à  $18.5 \text{ q ha}^{-1}$ , au cours de la période 2000-2010 [5]. La faiblesse de la production,

dont les causes sont multiples, associée à une forte demande alimentaire, justifie le fait que le pays se présente comme un gros importateur potentiel.

Le grain du blé dur (Figure 1.5) sert à la production de pâtes alimentaires, du couscous, et à bien d'autres mets comme le pain, le frik, et divers gâteaux [21]. Il est utilisé pour faire les chappattis dans le sous-continent indien et tortillas en Amérique Central et du Sud [17]. La paille est utilisée comme litière et comme aliment pour les animaux [22]. Le grain de blé dur a une grande valeur nutritionnelle, suite à sa richesse en protéine et la présence du gluten qui donne aux pâtes alimentaires une meilleure tenue à la cuisson [21, 23].



Figure1.5 : Le grain du blé dur.

### 1.3 Les contraintes de la production du blé dur

#### 1.3.1. Le stress hydrique

Tout facteur environnemental capable d'induire une contrainte potentiellement nuisible aux plantes est défini comme étant un stress. Le stress est donc toute contrainte extérieure qui limite le taux de la production en matière sèche de tout ou une partie de la plante. Les stress de nature non-biologique sont regroupés ensemble en tant que stress abiotiques, tandis que ceux de nature biologique sont désignés comme des facteurs de stress biotiques [24].

Les deux termes, stress hydrique et sécheresse, sont souvent utilisés de façon interchangeable. Le terme sécheresse a l'avantage de la clarté sur le terme stress hydrique. Pour la sécheresse, elle ne peut se référer qu'à un déficit et jamais à un excès d'eau. LEVITT [25] définit la sécheresse comme «toute combinaison d'approvisionnement restreinte en eau». La sécheresse peut être induite par une forte demande climatique ou par une faible pluviométrie. Sous climat méditerranéen, la sécheresse peut intervenir à n'importe quel stade du cycle de la culture [26].

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides. En effet, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement de la culture du blé dur. Les symptômes de la sécheresse peuvent varier, en fonction du stade de la culture, le génotype, l'intensité et la durée de la sécheresse. Le manque d'eau se traduit par une réduction de la croissance de la plante et de sa production par rapport au potentiel du génotype. Un manque d'eau précoce affecte principalement la croissance des racines, le développement des feuilles et des organes reproducteurs. Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture qui peut baisser de plus de 80% [27].

### 1.3.2. Le stress thermique

La température est un important facteur qui détermine le rythme de développement et donc la durée des phases végétatives de la plante. Dans les environnements méditerranéens, les hautes températures de fin de cycle sont considérées comme un facteur important de limitation de rendement. Des températures au-dessus de 30°C affectent le poids final du grain [28]. Pendant la période de tallage herbacé, des températures assez élevées, de l'ordre de 15-20°C, peuvent exercer un rôle favorable en permettant à la plante de produire un nombre de talles suffisants. En revanche, pendant la phase de montaison, l'occurrence plus fréquente de températures élevées a une incidence défavorable sur la croissance des tiges. La région des hauts plateaux est caractérisée aussi par le froid hivernal qui limite la croissance au moment où l'eau est disponible et allonge le cycle de la plante pour l'exposer à la sécheresse du début de l'été [27].

Dans cette région, les dégâts de gel tardif sont très fréquents sur céréales, rendant l'adoption des variétés précoces trop risquée [29].

### 1.3.3. Réponses adaptatives aux stress

Pour contrer le manque d'eau, les plantes développent des stratégies adaptatives qui varient en fonction des espèces, variétés et des milieux. La résistance de la plante à la contrainte hydrique peut être définie, physiologiquement, par la capacité de survivre et de croître, et du point de vue agronomique, par la capacité de produire un haut rendement. PASSIOURA [30] mentionne que la résistance globale d'une plante vis-à-vis du déficit hydrique est la résultante de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ces dernières interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production.

Pour éviter les périodes critiques du manque d'eau, certaines variétés accomplissent leur cycle de développement avant l'installation de la contrainte hydrique. De ce fait, la précocité constitue un important mécanisme d'échappement au déficit hydrique de fin de cycle, assurant ainsi une meilleure efficacité d'utilisation des précipitations. La précocité d'épiaison est utilisée comme critère de sélection pour améliorer les productions des zones où le stress hydrique est plus intense en fin de cycle de la culture [31]. Les génotypes trop précoces courent, cependant le risque d'être complètement détruit par les gels tardifs du printemps [32].

L'adaptation peut prendre forme, suite à des modifications d'ordre morphologiques pour améliorer l'absorption de l'eau, et/ou diminuer la transpiration et la compétition entre organes pour les assimilats produits. Ainsi, certaines variétés réduisent la surface foliaire et le nombre de talles pour ajuster leur consommation en eau. Elles sont dites plantes économes. D'autres possèdent la capacité d'enrouler le limbe foliaire pour minimiser la transpiration en réduisant les effets des stress thermique et lumineux. D'autres variétés investissent dans le développement d'un système racinaire profond pour avoir accès à des horizons plus humides, et ainsi, elles s'assurent une meilleure alimentation hydrique. Ces plantes sont dites dépendantes en eau [30,31].

## 1.4 Sélection pour l'adaptation et la performance

### 1.4.1 Utilisation des indices

FUKAI et COOPER [33] ont défini la tolérance à la sécheresse comme les mécanismes par lesquels les plantes tolérantes maintiennent les processus métaboliques, même avec un faible potentiel hydrique. LUDLOW et MUCHOW [34] mentionnent que, dans le contexte agricole, la notion de tolérance à la sécheresse doit associer performance et stabilité du rendement grain. Le développement de cultivars résistants à la sécheresse est une préoccupation majeure en sélection [35]. Les progrès réalisés dans ce domaine sont maigres suite aux difficultés et à la complexité de la nature des mécanismes qui semblent liés à la tolérance au manque d'eau et à la diversité des caractères qui expriment ces mécanismes [31]. De plus, c'est, le plus souvent, la réponse à plusieurs mécanismes combinés qui est mesurée et non l'effet d'un stress isolé [36].

Ainsi, la variation génétique de la réponse du rendement grain au stress hydrique a été rapportée dans de nombreux cas où les mesures sont réalisées en termes de performances de rendement grain en présence et en absence du stress. Ces études utilisent le rapport des rendements grain en présence et en absence du stress comme indice du degré de sensibilité à la contrainte hydrique [35]. Cette approche permet de mesurer simultanément le potentiel de la performance de rendement et le degré de résilience vis-à-vis de la contrainte hydrique [37,7].

De nombreuses techniques ont été envisagées pour quantifier la tolérance à la sécheresse. Plusieurs d'entre elles sont élaborées sous forme d'indices basés sur des relations mathématiques entre les valeurs de la variable mesurée en conditions favorables et en conditions de stress. L'indice de stabilité du rendement a été initié par YATES et COCHRAN [38], et ensuite utilisé par FINLAY et WILKINSON [39] et EBERHART et RUSSELL [40]. La méthode repose sur des régressions linéaires pour déterminer les cultivars qui sont adaptés à des environnements ciblés. Cette méthode consiste à tester des cultivars à travers un large éventail d'environnements pour estimer les coefficients de stabilité des performances de chaque cultivar. La méthode est simple d'utilisation, mais elle est

peu reproductible. Ainsi, un génotype classé comme stable dans une série d'essais, peut s'avérer instable dans une autre série d'essais [41,42].

L'indice de supériorité génotypique (P), proposé par LIN et BINNS [43], compare la productivité des génotypes à travers des environnements. Cette méthode utilise le génotype ayant le plus haut rendement dans chaque environnement comme point de référence. Les cultivars avec la plus grande différence de rendement que la référence ont la valeur de P la plus élevée. P associe performance de rendement et stabilité [36, 7]. L'indice S, développé par FISCHER et MAURER [35], mesure la sensibilité à la contrainte hydrique. Cet indice mesure l'écart de la performance du rendement du génotype considéré sous stress comparativement à l'écart moyen de l'ensemble des génotypes avec lesquels il est évalué. BENMAHAMMED *et al.* [7] mentionnent que cet indice mesure la tolérance à la contrainte et il est négativement lié à la performance.

#### 1.4.2. Utilisation de la variabilité génétique créée par croisement

##### 1.4.2.1. Les critères de sélection

Les caractères associés à la tolérance de la contrainte hydrique sont fugaces et insaisissables, selon la nature et l'intensité de la contrainte. Ceci explique les difficultés liées à l'utilisation de la génétique classique pour comprendre de la transmission héréditaire de ces caractères [36]. Plusieurs caractères, impliqués dans la tolérance à la contrainte hydrique, sont utilisés pour cribler des lignées en ségrégations. Il est important de connaître ceux qui sont plus ou moins associés à la tolérance, si l'on veut faire un progrès significatif. Ces caractères ne peuvent avoir de valeur pour le sélectionneur que s'ils répondent à certaines conditions. Ils doivent avoir suffisamment de variabilité génétique, à l'intérieur des populations criblées. Ils doivent présenter une corrélation significative avec le rendement en présence comme en absence de la contrainte hydrique. Le criblage sur la base de ces caractères doit être rapide, fiable, et peu coûteux.

Les caractères, qui sont rapportés dans la littérature, comme étant plus ou moins liés à la tolérance de la contrainte hydrique, sont nombreux [31]. LUDLOW et MUCHOW [44] font remarquer que tous ces caractères n'ont pas été évalués

de manière critique pour valider leur utilisation comme critères, simple ou associés, de sélection de la tolérance à la contrainte hydrique.

#### 1.4.2.1.1. La teneur relative en eau de la feuille

La teneur relative en eau est le rapport entre la quantité d'eau dans les tissus foliaires au moment de l'échantillonnage à celle présente lorsque la feuille est entièrement turgide. Elle est mesurée avec précision en utilisant le rapport du poids frais du tissu et le poids turgescent. La teneur relative en eau est un indice reproductible et fiable de l'état hydrique de la plante [37, 44]. CLARKE et MCCAIG [45] mentionnent que les cultivars tolérant à la sécheresse conservent une plus grande teneur en eau des feuilles que les cultivars sensibles. CLARKE *et al.* [46] suggèrent que la teneur relative en eau comme critère de criblage pour la sélection des lignées tolérantes à la contrainte hydrique. SANCHEZ-RODRIGUEZ *et al.* [47] notent que la teneur relative en eau est un des meilleurs indicateurs pour discriminer entre les cultivars tolérants et sensibles chez la tomate. DEDIO [48] rapporte que l'héritabilité de la rétention d'eau de la feuille excisée est sous contrôle génétique simple. Ce caractère est transmissible entièrement à la descendance, et il est positivement lié au rendement grain en présence de la contrainte hydrique.

#### 1.4.2.1.2. L'intégrité cellulaire

Les effets de la sécheresse contribuent de manière significative aux changements métaboliques et structurels de la plante. La structure et les fonctions de la membrane cellulaire sont affectées dès les premiers stades de la sécheresse. La membrane plasmique est la barrière ultime entre le cytoplasme et l'environnement. Elle représente le contrôle métabolique de tous les processus d'absorption. ZHANG *et al.* [49] mentionnent que la contrainte hydrique peut causer des blessures fonctionnelles conduisant à la fuite des électrolytes dans l'espace extracellulaire, et des dommages structuraux conduisant à la désintégration de la membrane. Le maintien de l'intégrité des membranes cellulaires en cas de stress hydrique est un des caractères universellement reconnus dans l'explication de la tolérance des plantes à la sécheresse. Cette intégrité dépend de l'activité de certaines enzymes hydrolytiques et protéolytiques

du catabolisme. L'ampleur de la réponse est fonction du degré de sensibilité de la plante et de sa capacité à mettre en œuvre des mécanismes de défenses par l'action des inhibiteurs de protéases et des antioxydants.

#### 1.4.2.1.3. La teneur en chlorophylle

La perte des pigments photosynthétiques a été utilisée comme critère pour évaluer la tolérance à la sécheresse des céréales. QUARTACCI et NAVARI-IZZO [50] rapportent que chez les céréales la *Chla* diminue significativement sous stress hydrique, alors qu'aucun changement significatif n'est noté pour la *Chlb*. WATANABE *et al.* [51] mentionnent qu'aucune relation n'existe entre la *Chlt* et la tolérance à la sécheresse mesurée par l'indice S de sensibilité à la contrainte hydrique.

#### 1.4.2.1.4. L'ajustement osmotique

L'ajustement osmotique est une forme spécifique d'accumulation de solutés qui régule la turgescence et l'hydratation pendant les périodes de sécheresse, avec des effets positifs sur la croissance. MORGAN [52] mentionne que l'accumulation des solutés chez le blé est une stratégie d'adaptation à la contrainte hydrique. Ce phénomène est également noté chez l'orge et chez le sorgho [53]. MORGAN [52] a sélectionné des lignées de blé ayant une capacité d'ajustement osmotique élevée à l'intérieure des populations en ségrégation sous serre. Les lignées ainsi sélectionnées présentent une plus grande performance de rendement grain en conditions de stress de plein champ.

MORGAN [54] rapporte que chez le blé, l'ajustement osmotique est sous contrôle mono génique. L'ajustement osmotique est de ce fait suggérée comme critère pour cribler les populations en ségrégation pour la tolérance à la contrainte hydrique [52, 55]. La variation génétique de l'ajustement osmotique, chez les blés est mentionnée par MORGAN [52, 54]. Cette caractéristique est génétiquement transmissible et de manière simple, ce qui permet de discriminer entre les groupes de génotypes à faible, moyenne et haute capacité d'ajustement osmotique. Ces classes ont, d'ailleurs, été dérivées à partir de la descendance aléatoire de la génération F<sub>4</sub> d'un croisement réalisé entre des variétés à haute et faible capacités d'ajustement osmotique [54].

#### 1.4.2.1.5. La proline

Sous stress, la proline libre est acceptée comme l'un des solutés organiques qui s'accumulent dans un large éventail d'organismes, des bactéries aux plantes supérieures. L'accumulation de la proline se produit lorsque les plantes sont exposées à un large éventail de contraintes environnementales, comme la sécheresse, ou à des températures basses ou élevées. L'accumulation de la proline libre est le cadre du processus d'ajustement osmotique qui est important pour l'adaptation au stress cellulaire de nombreuses espèces végétales telles que le blé [52]. La proline offre une protection en tant que réserve non-toxique d'azote et de l'énergie [56]. La quantité normale de la proline libre dans les plantes est généralement faible, comprise entre 0,2 et 0,7 mg g<sup>-1</sup> de matière sèche. Elle augmente rapidement entre 40 et 50 mg g<sup>-1</sup> de matière sèche lors de la déshydratation lente des tissus.

Chez le blé, une augmentation de proline et de l'asparagine dans les feuilles a été associée à l'adaptation à des conditions de stress sévères [57]. HANSON *et al.* [58] mentionnent qu'il est possible de sélectionner pour l'accumulation de proline en F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> issues d'un croisement entre des génotypes d'orge caractérisés par de haute et faible capacités d'accumulation de proline. Bien que le processus d'accumulation de la proline (constitutif vs inductif) n'est pas entièrement élucidé, la teneur en proline est héritée d'une manière relativement simple selon KUEH *et al.* [59]. La présence de la variabilité génétique pour l'accumulation de la proline, sous contrainte hydrique, suggère la possibilité de sélectionner, sur la base de ce caractère, des génotypes plus résilients vis-à-vis du stress hydrique [60].

#### 1.4.2.1.6. Le rendement et les composantes

Le rendement grain peut être analysé en termes de ses trois composantes, le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains. Ces composantes se développent chronologiquement et souvent se compensent mutuellement [28]. De ce fait, le rendement devient un critère de sélection complexe et peu reproductible. D'où il est nécessaire de tester le matériel végétal à travers un éventail de sites pendant plusieurs saisons, pour obtenir des résultats relativement précis [41]. Cependant, comme c'est le critère ultime sur lequel le

choix des génotypes est basé, il est le plus utilisé pour évaluer la tolérance à la contrainte hydrique.

BAHLOULI *et al.* [28] mentionnent que le poids de 1000 grains augmente en réponse à une réduction des nombres de grains par épi et par unité de surface. Cependant, pour un même nombre de grains par unité de surface, le rendement est plus élevé chez le génotype qui réalise un poids de 1000 grains élevé. La réalisation du potentiel du poids de 1000 grains est plus difficile sous conditions de sécheresse de fin de cycle. En effet, cette composante se matérialise en pleine période de stress [61].

Le nombre de grains par épi est un reflet de la différenciation et la mortalité des épillets et des fleurs par épillet au cours des différents stades de développement de la plante [62]. Sous stress hydrique, les fleurs des épillets des extrémités de l'épi se développent tardivement, ils avortent, réduisant le nombre de grains par épi [63]. Cependant, cette réponse est variable en fonction du nombre d'épis produits par unité de surface, de la taille et du nombre de grains déjà initiés et de la concurrence qui s'instaure entre la croissance du col de l'épi, la tige et le grain [64]. De ce fait, ce caractère est peu utilisé, seul, comme critère de sélection pour la tolérance à la sécheresse. Mais il est plutôt utilisé en sélection multi caractères sous la forme d'un indice [65].

#### 1.4.2.1.7. La biomasse et la hauteur de la plante

Le remplissage du grain est réalisé par le flux des assimilats produits par l'assimilation post-floraison et la part des réserves stockées dans le col de l'épi, qui est transférée vers le grain [66]. BLUM *et al.* [67] font observer que lorsque le stress hydrique s'installe, après la floraison, le rendement grain est largement déterminé par la mobilisation des réserves de la tige. Ainsi, la part des assimilats transférés est relativement marginale en bonnes années pour devenir importante lors des années défavorables, lorsque le stress hydrique affecte fortement l'appareil photosynthétique [68]. La longueur de la tige devient donc un important critère pour le stockage des réserves. La remobilisation des réserves de carbohydrates accumulés avant la floraison est considérée comme un caractère clé de l'adaptation au stress lié à la sécheresse terminale [34, 69].

#### 1.4.2.2. L'environnement de sélection

Pour augmenter la variabilité d'expression des caractères d'intérêts en sélection, l'évaluation peut être conduite sur plusieurs générations et dans différents milieux caractérisés par des contraintes hydriques différentes. Les milieux peuvent être créés par des dates de semis échelonnées pour positionner le cycle de la végétation à différents degrés de stress hydrique [70]. Cette méthode consiste à organiser des expériences entières comme des unités distinctes sur la base des dates de semis. L'hypothèse est que les différentes dates de semis seront caractérisées par des disponibilités de précipitations spécifiques. Ainsi, les génotypes des différentes dates de semis avec des précipitations ou des niveaux d'humidité connues peuvent ensuite être comparés.

RAJARAM *et al.* [71] mentionnent que la sélection pour la tolérance à la contrainte hydrique peut être améliorée en évaluant les génotypes simultanément sous conditions sèches et irriguées. Cette approche permet de discriminer entre les génotypes performants et tolérants, ceux qui sont performants mais sensibles, ceux qui sont tolérants mais peu performants et ceux qui sont non performants et non tolérants [7]. CECCARELLI *et al.* [72] suggèrent que la sélection pour les environnements secs doit se faire spécifiquement dans ces environnements, pour faire un progrès simultané en matière de performance et de tolérance.

#### 1.4.2.3. La sélection assistée par les marqueurs moléculaires

Les méthodes traditionnelles de sélection des plantes ont apporté une contribution significative à l'amélioration des cultures, mais elles ont été lentes dans le ciblage des caractères complexes tels que le rendement en grain, la qualité et la tolérance aux stress. Dans la sélection traditionnelle, pour identifier des lignées désirables à l'intérieur des populations en ségrégation, le sélectionneur fait face à de nombreuses difficultés. De larges populations doivent être criblées pour plusieurs caractéristiques : rendement grain, qualité, tolérance à la sécheresse, résistance aux maladies, précocité, hauteur. Il faut faire évoluer le matériel végétal, sous sélection, vers des générations plus avancées ( $F_7 - F_{10}$ ) avant de débiter la sélection pour les caractères quantitatifs complexes, pour lesquels la sélection précoce se montre peu efficace. Il est très difficile de cribler

une population en ségrégation pour un caractère désirable quand celui-ci est influencé par l'environnement (présence de l'interaction génotype x environnements). Ceci nécessite une sélection multi sites [73].

Le développement de la technologie des marqueurs moléculaires apparaît comme un outil indispensable d'appui aux programmes classiques d'amélioration. Les marqueurs moléculaires ne sont pas influencés par les fluctuations de l'environnement et sont indépendants de l'organe analysé et du stade de développement de la plante [74]. La recherche de marqueurs moléculaires étroitement liés aux gènes de résistance aux stress est une importante étape pour leur exploitation pratique dans le but d'améliorer l'efficacité des programmes de sélection [74]. Les marqueurs moléculaires, directement issus du polymorphisme existant au niveau de l'ADN, sont de plus en plus utilisés dans les programmes d'amélioration des plantes. Ils sont groupés en deux familles. La première est constituée par les marqueurs Co-dominants dont les plus courants sont les marqueurs RFLP et les microsatellites. La seconde famille est constituée par les marqueurs dominants, générés par des techniques RAPD ou AFLP qui permettent de réaliser facilement des empreintes génétiques [75].

#### 1.4.2.3.1. Les marqueurs RFLP

Les marqueurs RFLP sont les premiers marqueurs moléculaires utilisés pour la cartographie des gènes des plantes tels que le maïs, la tomate, le riz et l'orge [76]. Cette technique repose sur la mise en évidence de la variabilité de la séquence nucléotidique de l'ADN génomique après digestion par des enzymes de restriction. Une multitude de fragments d'ADN de tailles variables est générée par digestion enzymatique, puis séparée sur gel d'agarose et transférée par capillarité sous forme dénaturée sur une membrane de nylon. Cette membrane est mise en contact avec une solution contenant un fragment d'ADN ou sonde qui permet de repérer, par hybridation moléculaire, des fragments d'ADN génomique qui lui sont homologues. La différence entre deux génotypes est révélée par autoradiographie si la sonde est marquée par le phosphore radioactif ou par réaction colorée si elle est associée à un conjugué enzymatique [77]. Les marqueurs RFLP sont généralement Co-dominants.

#### 1.4.2.3.2. Les marqueurs basés sur la technique PCR

La PCR est une réplication d'un fragment ADN de façon répétitive et exponentielle *in vitro*. Cette technique offre l'avantage d'analyser les marqueurs moléculaires en un temps court tout en utilisant de faibles concentrations d'ADN. Les marqueurs basés sur la technique PCR tendent à remplacer les marqueurs de types RFLP. Ils sont très nombreux. Les plus largement utilisés sont les RAPD, les SSR et l'AFLP. Le principe de la technique RAPD consiste à réaliser une réaction PCR sur l'ADN de l'individu étudié en utilisant une amorce courte, de 10 nucléotides en général, de séquence arbitraire [78]. L'amorce s'hybridera à l'ADN ciblé autant de fois que ce dernier porte de séquences complémentaires à l'amorce ou de séquences portant un nombre limité de mésappariements. Si deux sites d'hybridation sont proches l'un de l'autre, à moins de 3000 pb, et en direction opposée ; c'est-à-dire dans une configuration permettant la réaction PCR, l'amplification aura lieu. Si un de ces deux sites est absent chez un autre individu, il n'y aura pas d'amplification et un polymorphisme de présence/absence sera observé [78].

Les produits d'amplification obtenus en RAPD, dont le nombre dépasse rarement la dizaine, sont en général séparés par électrophorèse en gel d'agarose. La technique RAPD peut rapidement être employée pour construire des cartes de liaisons génétiques. Cette technique est simple, rapide et ne nécessite ni un marquage radioactif ni une connaissance préalable de la séquence nucléotidique. Néanmoins, la RAPD manque de reproductibilité puisqu'elle est très sensible à la concentration de l'ADN et aux conditions d'amplification [78].

Le marqueur STS est une courte et unique séquence qui identifie un locus spécifique et peut être amplifié par PCR. Il est basé sur une paire d'amorces qui sont conçues par le séquençage d'une sonde RFLP représentant une séquence cartographiée avec un faible nombre de copies, caractérisant chaque STS. Le marqueur STS, établi sur une séquence de nucléotides de la sonde donne un modèle de bandes polymorphes [79]. Les STS ont l'avantage particulier par rapport aux RAPD d'être Co-dominants, c'est à dire qu'ils peuvent distinguer des homozygotes des hétérozygotes. Ils tendent aussi à être plus reproductibles. Comme avec les RAPD, l'utilisation de la PCR permet une génération rapide de

données est requiert peu d'ADN. Les méthodes STS utilisent les mêmes protocoles de base que les RAPD et requièrent le même équipement [79].

L'AFLP (Polymorphisme de longueur des fragments d'amplification) est une technique de PCR basée sur les empreintes génétiques [80]. Elle est fondée sur la mise en évidence conjointe de polymorphisme de sites de restriction et d'hybridation d'amorces arbitraires. Cette technique utilise à la fois les enzymes de restriction et l'amplification PCR. L'ADN génomique est clivé par deux enzymes de restriction. Des adaptateurs de séquences connues et spécifiques des enzymes de restriction utilisées sont ajoutés aux extrémités des fragments de restriction générant ainsi une matrice pour l'amplification.

Une première amplification, dite pré sélective, est réalisée à l'aide d'amorces de séquences complémentaires à la séquence des adaptateurs et des sites de restriction. La deuxième amplification, dite sélective, utilise des amorces identiques aux premières mais prolongées à l'extrémité 3' de quelques nucléotides arbitraires (de 1 à 3 nucléotides). Ainsi, seuls sont amplifiés les fragments possédant les bases complémentaires de ces bases arbitraires. Ces amorces sélectives permettent de réduire le nombre de fragments amplifiés à une centaine. Ces fragments sont séparés par électrophorèse sur gel d'acrylamide dénaturant puis visualisés par coloration au nitrate d'argent ou révélés grâce à un marquage radioactif ou fluorescent [81]. C'est la combinaison enzyme de restriction/amorce qui permet de révéler le polymorphisme entre les individus et constitue donc le marqueur AFLP.

La technique des AFLP présente un niveau élevé de polymorphisme associé à une haute reproductibilité, ce qui en fait une technique préférée des sélectionneurs. Elle connaît une large application dans l'empreinte génétique (*fingerprinting*), l'identification des cultivars et la détermination de leur relation phylogénétique, la cartographie des génomes et le clonage. Toutefois, la dominance, le coût élevé (elle est couverte par un brevet de la société néerlandaise Keygene qui a mis au point cette technique) et les difficultés techniques limitent son utilisation à grande échelle pour des applications comme la sélection assistée par marqueurs.

Les séquences microsatellites ou SSR (Simple Sequence Repeats) sont constituées de répétitions en tandem de motifs mono, di, tri ou tétra-nucléotidiques. Les plus courantes sont (A)<sub>n</sub>, (AT)<sub>n</sub>, (GA)<sub>n</sub>, (GT)<sub>n</sub>, (TAT)<sub>n</sub>, (GATA)<sub>n</sub>, etc., la valeur de n pouvant aller de quelques unités à plusieurs dizaines [75]. De tels motifs sont très abondants dans le génome des organismes. Chez les végétaux supérieurs, les premières estimations indiquent qu'il y aurait en moyenne un microsatellite di-nucléotidique tous les 30 à 100 kb. Ces éléments sont uniformément répartis en plusieurs exemplaires sur l'ensemble du génome d'une espèce et présentent un taux de polymorphisme élevé. Ce polymorphisme repose sur la variation du nombre d'unités de répétition constituant le microsatellite. Les séquences flanquant ces éléments répétés permettent de définir les amorces qui seront utilisées pour l'amplification PCR. L'analyse des produits amplifiés s'effectue sur gel d'acrylamide. C'est la paire d'amorces spécifiques des bordures droite et gauche du microsatellite qui constitue le marqueur. Le polymorphisme produit par un nombre variable de répétitions en tandem a été démontré dans un grand nombre d'espèces. Cette caractéristique a fait des microsatellites un marqueur moléculaire très attrayant pour les espèces avec une base génétique étroite telle que le blé et l'orge. Si les microsatellites constituent de bons marqueurs moléculaires (reproductibles, co-dominants et aisés d'utilisation), leur caractérisation initiale est toutefois assez lourde. En effet, leur production doit passer d'abord par le clonage et le séquençage de ces éléments répétés [75].

#### 1.4.2.3.3. Les QTL (*Quantitative Trait Loci*)

La cartographie permet d'ordonner les marqueurs, en indiquant les distances relatives entre eux et de les assigner à leurs groupes de liaison sur la base de leurs valeurs de recombinaison. La connaissance des concepts génétiques de la ségrégation et de la recombinaison est essentielle à la compréhension de la cartographie. La construction d'une carte de liaison est un processus qui suit la ségrégation des marqueurs moléculaires dans une population en ségrégation et mis ces marqueurs dans un ordre linéaire basé sur des fréquences de recombinaison des paires. Ainsi, une population cartographiée avec le nombre élevé des polymorphismes est fortement souhaitable. Les populations utilisées pour la cartographie sont habituellement dérivées des hybrides F<sub>1</sub> entre deux lignes (homozygote ou hétérozygote), qui montrent de la différence allélique pour

les sondes sélectionnées. Quatre types de population sont généralement employés pour la construction de carte et la cartographie expérimentale, ils sont la population  $F_2$ , la population Back Cross (BC), la population haploïde doublée (HD), et les lignées pures de recombinaison (RILs). La plupart des cartographies génétiques des populations chez les plantes ont été dérivées des croisements entre les parents en grande partie homozygotes.

Les caractères montrant la variation continue sont dit traits quantitatifs. Dans une population, les caractères quantitatifs montrent une variation phénotypique continue, résultant des effets des combinaisons alléliques et des conditions environnementales [82]. Chez les plantes cultivées, la plupart des caractères d'importance agronomique et économique montrent une transmission polygénique, telle que le rendement, la maturité des plantes, la résistance aux maladies et la tolérance au stress. Les loci génétiques, qui contrôlent des traits quantitatifs, sont désigné sous le nom de QTL (*Quantitative Trait Loci*). Durant les années 1980, l'étude des caractères quantitatifs a en grande partie comporté des approches biométrique basées sur les moyennes, les variances et les covariances et, par conséquent très peu a été connue au sujet de la nature biologique de la variation quantitative en termes de nombre et emplacement des gènes [83]. C'est pendant la décennie passée avec l'apparition de la technologie des marqueurs moléculaires efficaces et des méthodes statistiques spécifiques qu'il est devenu possible de suivre la ségrégation des caractères quantitatifs par l'intermédiaire des marqueurs liés et de détecter les effets, les nombres et les positions de QTL [84].

L'identification de QTL pour des caractères économiquement importants a été réalisée principalement par deux approches, que ce soit grâce à la cartographie de liaison à des marqueurs anonymes ou par des études d'association portant sur des gènes candidats. Le principe de la cartographie des QTL est d'associer le caractère (s) phénotypique évalué (s) avec des marqueurs moléculaires en utilisant des outils statistiques. La carte des emplacements des QTL peut alors être estimée par le moyen de marqueurs hautement associés.

En règle générale, la détection et la localisation des loci qui sous-tendent la variation des caractères quantitatifs comportent trois étapes essentielles. Tout d'abord, une population en ségrégation est créée et caractérisé avec des

marqueurs moléculaires. Cela conduit habituellement à la construction d'une carte génétique du génome éventail de la population. Deuxièmement, les individus de la même population sont phénotypiquement évalués pour les caractères en cours d'investigation. Enfin, des marqueurs moléculaires génotypiques sont analysés pour l'association avec les données sur les caractères phénotypiques en utilisant des méthodes statistiques appropriées. Ce type d'analyse QTL peut conduire à l'élucidation des paramètres QTL en termes de nombre, de position, les effets et les interactions entre eux.

L'association des marqueurs morphologiques avec des caractères quantitatifs chez les plantes a été observée par SAX [85] et les premiers pas vers la cartographie de QTL ou poly-gènes ont été pris sur la base des marqueurs rares disponibles [86]. Actuellement, des cartes génétiques complètes existent pour de nombreuses espèces cultivées et de nombreux algorithmes ont été développés pour la cartographie des QTL. L'approche gène-candidat est une méthode puissante et robuste. Comparé à la stratégie de la cartographie du génome entier, les chances de trouver des marqueurs liés aux QTL putatifs sont maximisées, depuis que la sélection des marqueurs de gènes candidats est basée sur des relations connues entre la biochimie, la physiologie et les caractères agronomiques étudiés. Cette approche a été appliquée avec succès dans diverses analyses QTL, comme la cartographie des QTL de réponse de défense à des maladies chez le blé [87, 88].

### 1.5. L'analyse diallèle

L'analyse diallèle est généralement employée dans des expérimentations pour étudier les propriétés génétiques des lignées parentales. Le diallèle est réalisé en faisant tous les croisements possibles entre les génotypes contribuant à l'analyse. C'est la méthode la plus usitée pour obtenir des informations sur la valeur des variétés utilisées comme parents, et pour évaluer l'action des gènes des variables mesurées et analysées [89]. Le croisement diallèle est spécifiquement conçu pour étudier les aptitudes de combinaison des parents et pour identifier les parents supérieurs afin de les utiliser dans les croisements et le développement des variétés. GRIFFING [9] a développé une gamme de procédures analytiques du diallèle qui aident les sélectionneurs à choisir la

stratégie de sélection appropriée et à comparer les modèles hétérotiques des descendance à un stade précoce dans les programmes d'hybridation [90].

Quatre méthodes d'analyse du croisement diallèle sont proposées par GRIFFING [9]. La méthode 1 analyse les données d'un diallèle où figurent les parents, les hybrides  $F_1$  et les croisements réciproques. La méthode 2 analyse les données d'un diallèle constitué des lignées et leurs hybrides  $F_1$ . La méthode 3 porte sur les hybrides  $F_1$  et leurs réciproques, alors que la méthode 4 porte uniquement sur l'analyse des hybrides. Deux modèles sont employés, le modèle fixé, qui considère que les informations issues de l'analyse du diallèle ne sont valables que pour les géniteurs utilisés, et le modèle aléatoire qui généralise les informations obtenues à l'ensemble de la population de géniteurs. L'analyse diallèle est réalisée en considérant les hypothèses restrictives suivantes qui sont une ségrégation diploïde et bi-allélique, absence d'épistasie, pas d'effet réciproque, les parents sont homozygotes, distribution indépendante des gènes mis en cause dans le contrôle des caractères analysés et pas de linkage. Ces hypothèses restrictives sont rarement remplies dans la pratique selon BAKER, [91].

#### 1.5.1. L'aptitude à la combinaison et l'effet d'hétérosis

Le concept de l'aptitude à la combinaison réfère à la capacité ou l'aptitude d'un génotype à transmettre ses performances (ses gènes) à sa descendance. L'analyse de l'aptitude à la combinaison permet de classer les lignées parentales en termes de valeur génétique et d'identifier les meilleures combinaisons hybrides [92]. C'est une méthode qui mesure la nature de l'action des gènes impliqués dans le contrôle des caractères quantitatifs [91]. L'aptitude générale à la combinaison (AGC) est la performance moyenne d'une lignée dans une série de combinaisons hybrides, tandis que l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) réfère à la performance d'une combinaison spécifique d'une lignée dans un croisement particulier [91]. L'AGC est associée à des effets géniques additifs, alors que l'ASC est liée à des effets géniques de dominance et épistatiques.

Les effets d'AGC représentent la composante fixable de la variance génétique. Ils sont importants pour la sélection de lignées supérieures. Les effets

de l'ASC représentent une composante non-fixable de la variance génétique, ils fournissent des informations sur les performances des hybrides [91]. Le rapport AGC:SCA estime le type d'action des gènes, qui contrôlent une caractéristique particulière [93]. Lorsque le ratio est élevé, il signifie que l'effet des gènes additifs est plus important. Si le ratio est faible, il signifie la prépondérance des effets géniques non-additifs dans la détermination du caractère analysé [91].

L'hétérosis est définie comme l'augmentation de la vigueur de l'hybride par rapport à la moyenne de ses parents [94]. Cet effet s'explique par la dominance et la sur-dominance. Sous l'hypothèse de la dominance, l'hétérosis est causée par le masquage des allèles récessifs hérité d'un cultivar par les allèles dominants hérités du second parent. L'hétérosis peut être estimée relativement au parent moyen et/ou relativement au parent supérieur [95].

#### 1.5.2. Les composantes de la variance et l'héritabilité

La variation des caractères quantitatifs est exprimée en termes de variance. La variance totale d'un caractère donné est dite variance phénotypique ( $\sigma^2_p$ ). Elle est la somme de la composante environnementale ( $\sigma^2_e$ ) et de la composante génétique ( $\sigma^2_G$ ) :  $\sigma^2_p = \sigma^2_e + \sigma^2_g$  [82]. La variance de l'environnement est une source d'erreur dans les études génétiques et comprend toutes les variations d'origine non génétique. Elle réduit de l'efficacité de la procédure de sélection par l'interaction entre les génotypes et les phénotypes [96]. En sélection, la variance génétique est la composante la plus importante, car elle détermine la réponse à la sélection. La composante génétique est la somme des composantes additive ( $\sigma^2_A$ ), de dominance ( $\sigma^2_D$ ) et épistatique ( $\sigma^2_I$ ). La variance additive détermine l'héritabilité au sens étroit. L'héritabilité mesure le degré de ressemblance entre les apparentés. Elle exprime la proportion de la variance totale qui est d'origine génétique [82]. L'héritabilité au sens large est définie comme le rapport de la variance génétique totale à la variance phénotypique :

$$h^2_{sens\ large} = \frac{\sigma^2_G}{\sigma^2_p}$$

L'héritabilité au sens étroit est le rapport de la variance génétique additive à la variance phénotypique.

$$h^2_{sens\ étroit} = \frac{\sigma^2_A}{\sigma^2_p}$$

Héritabilité au sens étroit est plus fiable et elle est importante pour les programmes de sélection, parce que la variabilité génétique additive est transmise à la descendance [82]. Les estimations d'héritabilité donnent une indication de la réponse attendue de la sélection dans les populations en ségrégation [82].

## CHAPITRE 2

### MATERIELS ET METHODES

#### 2.1. Le site expérimental

L'expérimentation a été conduite au niveau de la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif durant les campagnes 2010/11 et 2011/12. Les coordonnées géographiques du site sont 36° 09' N et 5° 22' E, à une altitude de 1081 m [73]. Le climat de la région du site expérimental est de type méditerranéen, continental, semi-aride, caractérisé par un été chaud et sec, un hiver froid, une pluviométrie irrégulière, des gelées printanières très fréquentes et des vents chauds et desséchants en fin de cycle des céréales. Le sol est caractérisé par une structure argileuse pour le premier horizon et limono-argileuse pour le second et le troisième horizon. Le taux de matière organique est faible, il varie de 1,32 à 2,4 %. Le calcaire total est de 35 %. Le pH est basique prenant une valeur moyenne de 8.2 [27].

#### 2.2. Le matériel végétal

Le matériel végétal parental est constitué de six variétés de blé dur prises de la pépinière de croisement de la Station Expérimentale Agricole de Sétif. Ces variétés sont Waha, Zenati-Bouteille/Flamengo, Mexicali<sub>75</sub>, Ofanto, (gaviota/durum) et Guemgoum Rkhem.

**Waha** est une variété dont le pédigrée est **Plc/Ruff//Gta's/3/Rolette** provenant du croisement **CM.17904**, réalisé par CIMMYT (Mexique). Elle fut sélectionnée et proposée à l'inscription par la station ITGC de Sétif, en 1985. C'est une variété à paille relativement courte, précoce d'épiaison et très productive. Elle présente une forte sensibilité au gel tardif. Elle occupe une large proportion des emblavements de blé dur au niveau national [97].

**Zenati Bouteille/Flamengo** est une sélection de la station ITGC de Sétif dont le pédigrée est **Zb/Fg's//Lk/3/Ko<sub>120</sub>/4/Ward**. C'est une variété de précocité similaire à celle de Waha, plus haute de paille, mais moins productive [97].

**Mexicali<sub>75</sub>** est une variété dont le pédigrée est **Gdo.vz 469/3/Jo's//61.130/Lds/4/Stk'**, provenant du croisement de CIMMYT **CM 470**. Cette variété est très précoce, de taille moyenne, elle est très productive, mais craint le gel tardif [97].

**Ofanto** est issue du croisement italien **Adamelo /Appulo**. Elle fut introduite dans le cadre du projet de coopération ITGC-IAO. C'est une variété très productive, mais sensible à la variation des milieux [97].

**Gta dur (Gaviota/durum)** est une lignée issue du croisement réalisé en 1972 par le CIMMYT. C'est une variété qui présente, avec le cultivar Chen's, une large adaptation à la région de production de blé dur couvrant les plaines intérieures et une grande partie des hauts plateaux [73]. Elle a été inscrite au catalogue officiel et recommandée à la grande culture par la station de l'Institut Technique des Grandes Cultures de Guelma [97].

**Guemgoum Rkhem** est une sélection généalogique faite à l'intérieur d'une population locale de blé dur de la région de Tiaret.

Ces variétés ont été croisées au cours du printemps de la campagne agricole 2010/2011 dans un dispositif diallèle 6 x 6, sans les réciproques pour produire quinze hybrides F<sub>1</sub>. Les graines de chaque croisement ont été récoltées et conservées séparément. Au mois de décembre de la campagne agricole 2011/2012, les six parents et leurs hybrides F<sub>1</sub> ont été semés dans un dispositif en bloc avec trois répétitions (Tableau 2.1).

Chaque génotype (les lignées parentales et leurs progénitures F<sub>1</sub>) est semé manuellement, sur une ligne de 2.5 m de long. Les espacements entre les rangs et les plants sont respectivement 30 et 15 cm. Les techniques culturales adoptées sont celles préconisées par la station ITGC de Sétif. Le précédent cultural est une jachère travaillée.

Tableau 2.1 : Randomisation en plein champs des géniteurs de blé dur et de leurs hybrides F<sub>1</sub>.

Ordre	Parent/croisement	Répétition I	Répétition II	Répétition III
1	Waha	1	31	60
2	Waha//ZB/Fg	2	39	49
3	Waha//Mexicali <sub>75</sub>	3	42	59
4	Waha//Ofanto	4	30	50
5	Waha//Gta dur	5	32	58
6	Waha //Guemgoum Rkhem	6	22	48
7	Zenati Bouteille/Flamengo (ZB/Fg)	7	40	57
8	ZB/Fg//Mexicali <sub>75</sub>	8	33	51
9	ZB/Fg//Ofanto	9	29	56
10	ZB/Fg//Gta dur	10	38	43
11	ZB/Fg//Guemgoum Rkhem	11	34	55
12	Mexicali <sub>75</sub> (Mex <sub>75</sub> )	12	23	47
13	Mex <sub>75</sub> /Ofanto	13	35	62
14	Mex <sub>75</sub> /Gta dur	14	28	52
15	Mex <sub>75</sub> /Guemgoum Rkhem	15	36	44
16	Ofanto	16	24	61
17	Ofanto/Gta dur	17	37	53
18	Ofanto/Guemgoum Rkhem	18	27	63
19	(gaviota/durum) (Gta Dur)	19	25	45
20	Gta dur/Guemgoum Rkhem	20	41	54
21	Guemgoum Rkhem	21	26	46

### 2.3. Caractères mesurés

Les notations et mesures ont porté sur :

- ✓ la détermination de la durée de la phase végétative en nombre de jours calendaires comptés à partir du 1<sup>ier</sup> janvier à la date de réalisation de 50% de l'épiaison. La date d'épiaison est indiquée par la sortie des barbes de la gaine de la dernière feuille complètement développée.

- ✓ La hauteur de la plante qui est mesurée à la récolte. Elle est prise en cm du sol jusqu'à la pointe de l'épi, barbes non incluses.
- ✓ La longueur de l'épi du maître brin de 5 plants a été mesurée en centimètre (cm) de la base de l'épi jusqu'au sommet en excluant les barbes. La longueur du col est mesurée aussi au même stade, elle représente la longueur prise du dernier nœud jusqu'au premier article de l'épi.
- ✓ L'extrusion est mesurée à partir de l'emplacement de la ligule de la dernière feuille jusqu'à la base de l'épi, elle représente la partie de la tige qui est hors de la gaine de la dernière feuille.
- ✓ La surface de la feuille étendue est estimée par le produit de la longueur et de la plus grande largeur qui sont mesurées sur un échantillon de 5 feuilles prises au hasard au stade épiaison :  $SF (cm^2) = 0,607(L \times l)$  où SF est la surface foliaire, 0,607 est le coefficient de régression de la surface estimée à partir du papier grammage sur celle déduite par le produit (L x l), L et l sont la longueur et la largeur de la feuille moyenne.
- ✓ Le poids spécifique foliaire (PSF) a été calculé par le rapport du poids de la matière sèche (PS) sur la surface (SF) de la feuille étendue :

$$PSF (mg. cm^{-2}) = [PS/SF]$$

- ✓ La teneur relative en eau (TRE) a été mesurée sur la dernière feuille entièrement développée pour déterminer l'état hydrique des plantes. La feuille échantillonnée par traitement est coupée au niveau de la base du limbe et directement pesée pour avoir le poids de la matière fraîche (PF, mg). Elle est ensuite placée dans un tube à essai contenant de l'eau distillée, à l'abri de la lumière à la température ambiante du laboratoire pendant 4 heures, pour atteindre l'état turgide. La feuille est à nouveau pesée, après avoir pris soin de l'essuyer de l'excès d'eau avec du papier buvard, pour obtenir le poids turgide (PT, mg). L'échantillon est enfin mis à sécher dans une étuve, à 65°C pendant 16 heures afin de déterminer le poids sec (PS, mg). Les valeurs de la teneur relative en eau sont calculées à partir de la formule :

$$TRE (\%) = \left[ \frac{PF-PS}{PT-PS} \right] \times 100$$

- ✓ Le dosage de la quantité de proline accumulée : La méthode utilisée est celle de TROLLS et LINDSLEY, [98], simplifiée et mise au point par MONNEUVEUX et NEMMAR [99]. Cent (100) mg de matière fraîche (pour chaque génotype) prélevés sur les tiers médians des feuilles, sont immédiatement pesés puis placés dans un tube à essai. Un volume de 2 ml de méthanol à 40% est ajouté à l'échantillon et le tout est chauffé, pendant 1 h, dans un bain-marie à 85°C. Après refroidissement, 1 ml de la solution d'extraction est ajouté à 1 ml d'acide acétique, 25 mg de Ninhydrine et 1 ml du mélange (eau distillée, acide acétique, acide ortho phosphorique de densité 1,7), (120, 300, 80: v / v / v). La solution obtenue est portée à ébullition pendant 30 mn à 100°C, la solution vire au rouge, après refroidissement, 5 ml de toluène sont rajoutés à la solution qui est agitée, deux phases se séparent (une phase supérieure de couleur rouge contient la proline et une phase inférieure transparente sans proline). La phase supérieure est récupérée et déshydratée par l'ajout d'une spatule de Sulfate de Sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhydre. La densité optique (DO) est lue à l'aide d'un spectrophotomètre (Helios Epsilon) sur une longueur d'onde de 528nm. Les valeurs obtenues sont converties en taux de proline par le biais d'une «courbe étalon» préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue. Cette courbe est utilisée pour déterminer les teneurs en proline dans les feuilles des plantes en  $\mu\text{g/g}$  de matière fraîche.
- ✓ La teneur en chlorophylle totale de la feuille étendard : Le taux de chlorophylle de la feuille étendard a été mesuré au stade épiaison à l'aide deux appareils à raison de cinq (5) lectures par génotype, dont la moyenne est retenue pour l'analyse.
  - Le chlorophylle-mètre SPAD- 502 (MINOLTA, Osaka, Japon) est un simple appareil portable de diagnostique qui peut mesurer la verdeur ou la teneur relative en chlorophylle des feuilles. L'appareil permet des lectures instantanées et non-destructives. Les valeurs sont calculées en se basant sur la transmittance lumineuse de la feuille dans deux domaines de longueurs d'ondes : 650 nm et 940 nm, où l'absorbance de la chlorophylle est différente. En tenant compte de ces deux transmittances, une valeur numérique (valeur SPAD) est calculée. Elle est proportionnelle à la teneur en chlorophylle totale présente dans la feuille. La surface de mesure du

SPAD est de 0,06 cm<sup>2</sup> et l'épaisseur de l'échantillon doit être supérieure à 1,2 mm.

- Le chlorophylle- mètre CCM200 (CCM-200, Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, USA) est un appareil aussi portatif destiné pour des mesures rapide et non destructives. Le CCM-200 utilise l'absorbance pour estimer la teneur en chlorophylle dans les tissus foliaires. Deux longueurs d'ondes (655 et 940 nm) pour la détermination de l'absorbance. Une longueur d'onde fait partie du domaine d'absorbance de la chlorophylle tandis que l'autre serve pour compenser des différences mécaniques telles que l'épaisseur de tissu. L'appareil mesure l'absorbance des deux longueurs d'onde et calcule une valeur de l'index de concentration en chlorophylle (CCI), qui est le rapport de l'absorbance optique à 655 nm à celui à 940 nm, est proportionnelle à la quantité de chlorophylle dans l'échantillon.
- ✓ Le nombre d'épis par plant (NE), de grains par épi (NGE), le poids de mille grains (PMG), le rendement par plant, le poids des épis, le poids de la paille et l'indice de récolte ont été déterminés à la récolte sur l'ensemble des plants des hybrides et des lignées parentales.

#### 2.4 Analyse des données

Une analyse de la variance des données recueillies a été faite afin de déterminer l'effet génotype. Par la suite, ces données ont été traitées selon le modèle 1 et la méthode 2 de GRIFFING [9] pour estimer les effets d'aptitude générale et spécifique à la combinaison. Les effets génétiques sont déduits par les formules suivantes [9]:

$$X_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + \frac{1}{bc} \sum_c \sum_l e_{ijkl}$$

$\mu$  = moyenne de la population estimée par la moyenne générale de l'essai

$g_i$  ( $g_j$ ) = effet de l'aptitude générale à la combinaison du parent  $i$  ( $j$ )

$s_{ij}$  = effet de l'aptitude spécifique à la combinaison de l'hybride des parents  $i$  et  $j$

$e_{ijkl}$  = erreur résiduelle

$$\mu = \frac{1}{p^2} X_{..}$$

L'analyse de la variance des effets d'aptitudes générale et spécifique à la combinaison est réalisée selon GRIFFING [9] comme indiquée au tableau 2.2.

Tableau 2. 2 : Méthode II, modèle 1 de l'analyse des aptitudes générale et spécifique à la combinaison.

Source	ddl	SCE	CM	Espérances des carrés moyens
AGC	$n-1$	$\frac{1}{n+2} \left[ (X_{i.} + X_{ii})^2 - \frac{4}{n} X^2_{..} \right]$	CM <sub>g</sub>	$\sigma^2 + (p+2) \left( \frac{1}{p-1} \right) \sum g_i^2$
ASC	$\frac{n(n-1)}{2}$	$\sum \sum X^2_{ij} - \frac{1}{n+2} \sum (X_{i.} + X_{ii})^2 + \frac{2}{(n+1)(n+2)} X^2_{..}$	CM <sub>s</sub>	$\sigma^2 + \frac{2}{p(p-1)} \sum_i \sum_j S_{ij}^2$
Erreur	$\left[ \frac{n(n+1)}{2} - 1 \right] (r-1)$	$\frac{SCE_{Totale} - SCE_{Trait} - SCE_{Re p}}{r}$	CM'e	$\sigma^2$

AGC = aptitude générale à la combinaison, ASC = aptitude spécifique à la combinaison, ddl= degré de liberté, SCE = Somme des carrés des écarts, CM = Carré moyen, CM'e = CMe/b avec b le nombre de bloc, CMe = erreur ou interaction génotype X bloc, calculée par l'analyse de la variance des moyennes du caractère étudié.

X..= somme des valeurs de toutes les combinaisons hybrides et des valeurs parentales

Xi. = somme des valeurs de toutes les combinaisons du parent i

X.j = somme des valeurs de toutes les combinaisons du parent j

Xii ou Xjj= sont les valeurs des parents i (j)

### 2.4.1. L'estimation des effets des aptitudes à la combinaison (AGC et ASC)

L'effet de l'aptitude générale à la combinaison (AGC)

$$g_i = \frac{1}{p+2} \left( X_{i.} + X_{.i} - \frac{2}{p} X_{..} \right) \quad (\sum_i g_i = 0)$$

L'effet de l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC)

$$s_{ij} = X_{ij} - \frac{1}{p+2} (X_{i.} + X_{.i} + X_{.j} + X_{jj}) + \frac{2}{(p+1)(p+2)} X_{..} \quad (\sum_i s_{ij} + s_{ii} = 0)$$

L'erreur standard des effets de l'AGC et l'ASC et le test de signification des différences entre chaque deux  $g_i$  et deux  $s_{ij}$

$$SE_{(g_i)} = \sqrt{\left[ \frac{(p-1)}{p(p+2)} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(s_{ii})} = \sqrt{\left[ \frac{p(p-1)}{(p+1)(p+2)} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(s_{ij})} = \sqrt{\left[ \frac{p^2 + (p+2)}{(p+1)(p+2)} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(g_i - g_j)} = \sqrt{\left[ \frac{2}{p+2} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(s_{ij} - s_{jj})} = \sqrt{\left[ \frac{2(p-2)}{p+2} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(s_{ij} - s_{ik})} = \sqrt{\left[ \frac{2(p-2)}{p+2} \times CM'e \right]}$$

$$SE_{(s_{ij} - s_{kl})} = \sqrt{\left[ \frac{2p}{p+2} \times CM'e \right]}$$

Le test t est utilisé pour tester la signification de chaque  $g_i$  ou  $s_{ij}$ ,

$$t_i = \frac{g_i}{SE_{(g_i)}} \dots \dots \dots (\text{à } p-1 \text{ ddl})$$

$$t_{ij} = \frac{s_{ij}}{SE_{(s_{ij})}} \dots \dots \dots (\text{à } p(p-1)/2 \text{ ddl})$$

### 2.4.2. L'estimation des composantes génétiques de la variance

Les variances des aptitudes à la combinaison sont calculées selon les formules suivantes :

La variance de l'aptitude générale à la combinaison  $\sigma^2_{AGC}$  :

$$\sigma^2_{AGC} = \frac{(CMg - CM'e)}{(p + 2)}$$

La variance de l'aptitude spécifique à la combinaison  $\sigma^2_{ASC}$  :

$$\sigma^2_{ASC} = (CMs - CM'e)$$

La variance de l'erreur  $\sigma^2_e$  :

$$\sigma^2_e = CM'e$$

La variance additive  $\sigma^2_A$  :

$$\sigma^2_A \text{ (variance additive)} = 2\sigma^2_{AGC}$$

La variance de dominance VD:

$$\sigma^2_D \text{ (variance de dominance)} = \sigma^2_{ASC}$$

La variance génétique  $\sigma^2_G$

$$\sigma^2_G = \sigma^2_A + \sigma^2_D$$

La variance phénotypique  $\sigma^2_P$

$$\sigma^2_P = \sigma^2_G + \sigma^2_e$$

### 2.4.3 Estimation des coefficients de variation génotypique et phénotypique

Les coefficients de variation génotypique et phénotypique sont calculés selon BURTON et DEVANE [100].

$$\text{Coefficient de variation génotypique (CVG)} = \left( \frac{\sqrt{Vg}}{\bar{x}} \right) \times 100$$

$$\text{Coefficient de variation phénotypique (CVP)} = \left( \frac{\sqrt{Vp}}{\bar{x}} \right) \times 100$$

Où :

Vg = variance génotypique

Vp = variance phénotypique

$\bar{x}$  = moyenne générale du caractère

CVG et CVP sont classés comme faible, moyen et élevé comme indiqué par SIVASUBRAMANIAN et MENON [101].

De 0 à 10% : faible

De 10 à 20% : moyen

Supérieur à 20% élevé.

Les logiciels SAS (Version 9), OPSTAT et Excel 2007 ont été utilisés pour les analyses statistiques.

## 2.5. Estimation de l'héritabilité

L'héritabilité est déterminée comme suit :

- Héritabilité au sens large

$$h^2_{sens\ large} = \frac{\sigma^2G}{\sigma^2p}$$

Avec

- I.  $\sigma^2G$  = variance génotypique totale
- II.  $\sigma^2p$  = variance phénotypique totale

- Héritabilité au sens étroit

$$h^2_{au\ sen\ étroit} = \frac{\sigma^2A}{\sigma^2p}$$

Le pourcentage de l'héritabilité est catégorisé comme faible, moyen et élevé selon ROBINSON *et al.* [102].

0 – 30% : faible

30 – 60%: moyen

60% et plus: élevé

## 2.6. Estimation de l'hétérosis

L'hétérosis par rapport au parent moyen et par rapport au meilleur parent sont calculés selon les formules suivantes :

$$H_{MP} = \frac{(F_1 - MP)}{MP} \times 100$$

$F_1$  = valeur moyenne de l'hybride

MP = moyenne des deux parents mis en jeu

$$H_{BP} = \frac{(F_1 - BP)}{BP} \times 100$$

BP = valeur du meilleur parent

La différence de l'hybride  $F_1$  et la valeur du parent moyen ou du meilleur parent est évaluée en utilisant  $t$ -test [103].

$$t = \frac{(F_{1ij} - MP_{ij})}{\sqrt{\frac{3}{8}\sigma_e^2}}$$

$$t = \frac{(F_{1ij} - BP_{ij})}{\sqrt{\frac{1}{2}\sigma_e^2}}$$

$F_{1ij}$  = La moyenne d'ij ème  $F_1$

$MP_{ij}$  = Valeur du parent moyen d'ij ème croisement

$BP_{ij}$  = Valeur du meilleur parent d'ij ème croisement

$\sigma_e^2$  = Variance estimée de l'erreur

## CHAPITRE 3

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Climat des campagnes d'étude

Durant les deux campagnes agricoles (2010/2011 et 2011/2012), la pluviométrie enregistrée était de 408,7 et 329,0 mm respectivement au cours de la période allant du mois de septembre à juin, correspondant au cycle de la culture du blé. Le cumul pluviométrique moyen enregistré sur vingt ans (20) est de 352,9mm.

Les températures moyennes pour la même période varient de 5,6°C (2010/11) et 2,4°C (2011/12) pour le mois de février au 26,4 et 26,3°C pour le mois de juin respectivement (Figure 3.1).

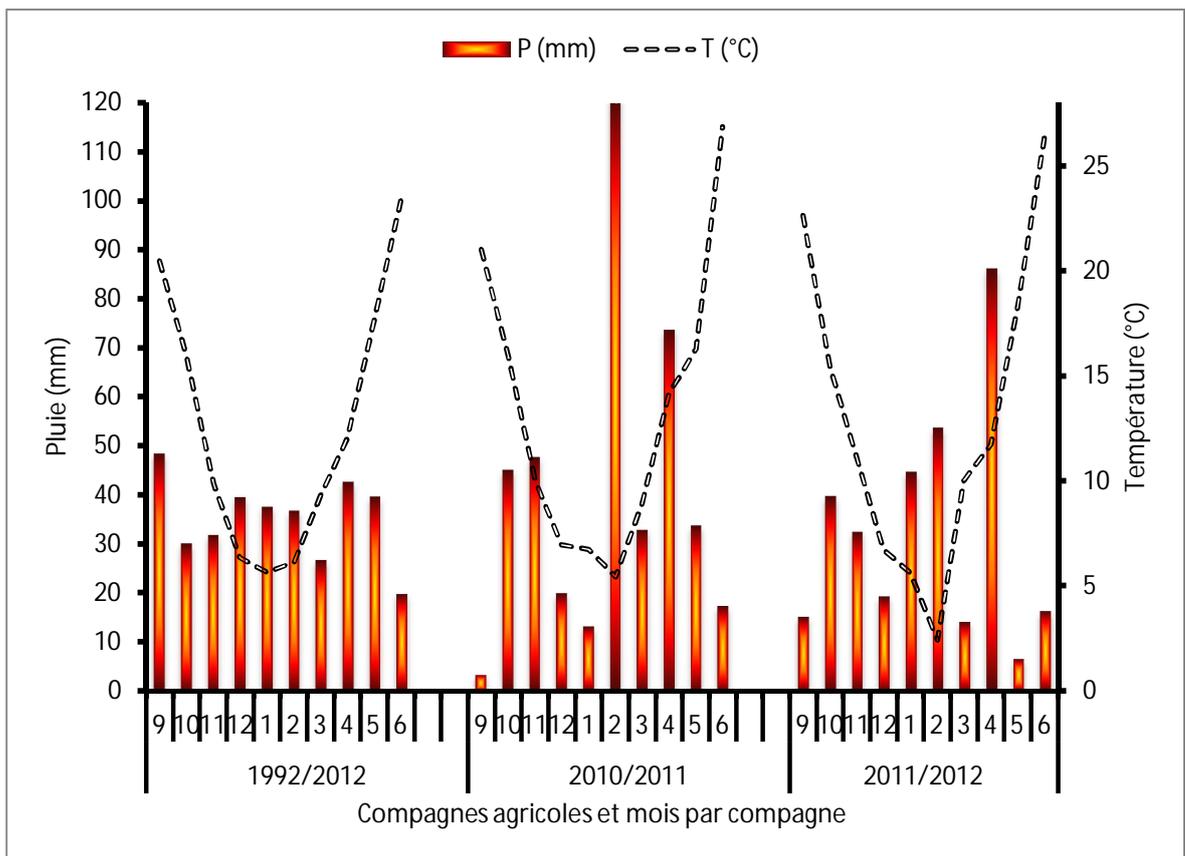


Figure 3.1 : Répartition de température et la pluviométrie durant deux campagnes et les moyennes sur 20 ans.

La répartition de la température est bimodale, élevée au cours de l'été et basse au cours de l'hiver. De novembre au mois de mars, la température moyenne mensuelle reste inférieure à 10°C, seuil qui permet à la végétation de croître normalement pour valoriser les eaux de pluie enregistrées. La pluviométrie montre une distribution variable d'un mois à l'autre et d'une campagne à l'autre. Ainsi, la campagne 2010/2011 est pluvieuse avec une répartition relativement homogène. Par contre, durant la campagne 2011/2012 malgré un hiver rude avec des chutes importantes de neige et un cumul pluviométrique de 329mm, la répartition est variable notamment durant la fin de cycle où on a enregistré uniquement 6,6mm durant le mois de mai et 16,4 mm durant le mois de juin, période qui coïncide avec la phase de remplissage du grain de la céréale dans la région d'étude. Cette sécheresse de fin de cycle a fortement touchée le rendement grain et le poids de 1000 grains.

### 3.2. Analyse génétique

#### 3.2.1. Analyse de la variance

L'analyse de variance montre un effet génotype significatif chez les parents et les hybrides  $F_1$  pour l'ensemble des caractères mesurés (Tableau 3.1). Ceci indique la présence d'une variabilité génétique suffisante parmi les génotypes étudiés qui peut être exploitée en sélection dans le programme d'amélioration du blé dur. La présence de la variabilité génétique autorise à conduire l'analyse génétique des variables mesurées et qui montrent un effet génotype significatif, selon FARSHADFAR *et al.* [104].

#### 3.2.2. Analyse des performances moyennes

##### 3.2.2.1. Caractères physiologiques

Les valeurs les plus élevées du contenu en proline sont mesurées chez l'hybrides Waha /Guemgoum Rkhem avec une valeur moyenne de 16.1  $\mu\text{g g}^{-1}$  MF, suivi de Waha/Mexa<sub>75</sub> et ZB/Fg//Ofanto avec une valeur moyenne de 14.3  $\mu\text{g g}^{-1}$  MF ; alors que la plus faible valeur moyenne, de 8.3  $\mu\text{g g}^{-1}$  MF, est notée chez Mex<sub>75</sub>/Ofanto (Tableau 3.2). Les valeurs de la teneur relative en eau foliaire varient de 76.9%, valeur moyenne minimale mesurée chez l'hybride Waha/Ofanto et la valeur moyenne maximale de 96.8%, mesurée chez le cultivar Mexicalli<sub>75</sub>.

Tableau 3.1 : Carrés moyens de l'analyse de variance des caractères mesurés chez les parents et les hybrides F<sub>1</sub>.

Source	Bloc	Génotype	Erreur	F <sub>obs</sub>	F <sub>tab5%</sub>
ddl	2	20	40		
Pro	18.0	172.5	11.95	14.5	1.8
TRE	28.0	56.5	47.2	1.2	1.8
Chl <sub>s</sub>	20.4	62.6	7.4	8.5	1.8
Chl <sub>c</sub>	98.7	216.1	32.28	6.7	1.8
PREC	19.0	34.7	3.73	9.3	1.8
SF	185.0	60.2	15.7	3.83	1.8
PS	3.4	4.81	4.08	1.18	1.8
HT	278.2	373.3	43.67	8.55	1.8
COL	15.1	26.5	8.01	3.31	1.8
Ext	5.3	12.9	1.9	6.79	1.8
LE	1.0	1.6	0.2	7.0	1.8
BIO	3232.0	1034.0	603.28	1.71	1.8
PLL	460.6	338.0	113.0	2.99	1.8
HI	19.6	81.0	11.7	6.92	1.8
PNE	998.8	267.0	202.3	1.32	1.8
NE	47.3	28.0	20.61	1.36	1.8
NGE	95.1	335.0	85.0	3.94	1.8
PMG	143.4	49.0	24.8	1.98	1.8
RDT	485.0	138.0	89.8	1.54	1.8

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la palle/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000 grains, RDT : rendement grains/plant.

L'hybride ZB/Fg//Ofanto présente une teneur relative en eau moyenne de 89.2% associée à un contenu en proline de 14.3 µg g<sup>-1</sup> MF (Tableau 3.2). Pour la chlorophylle mesurée avec le SPAD et le CCI, les valeurs arbitraires varient de 43.4 à 60.8 pour le SPAD, valeurs mesurées chez l'hybride (Gaviota/durum) / Guemgoum Rkhem et le cultivar Ofanto et de 26.8 à 52.2 unités CCI, valeurs mesurées chez les deux génotypes ci-dessus cités dans cet ordre (Tableau 3.2). Il existe une relation moyennement élevée (R<sup>2</sup>=73%) entre les mesures de la chlorophylle faites avec les deux instruments SPAD et CCI (Figure 3.2). Ceci suggère l'utilisation d'un seul de ces deux instruments pour mesurer le contenu en chlorophylle dans les recherches futures et en plus ne faire que l'analyse génétique de ce caractère mesuré avec un seul de ces deux instruments. Pour ces trois variables, qui représentent les caractères dits physiologiques, seul le cultivar Ofanto présente des valeurs relativement élevées pour le contenu en

proline (15.3  $\mu\text{g g}^{-1}$  MF), la teneur relative en eau (95.2%) et la chlorophylle (60.8 SPAD et 52.2 CCI).

### 3.2.2.2. Caractères phéno- morphologiques

Du point de vue précocité au stade épiaison, le cultivar Guemgoum Rkhem est le plus tardif, avec une moyenne de 147.0 jours ; alors que le cultivar Ofanto présente la durée la plus courte, avec une moyenne de 131.6 jours. Guemgoum Rkhem et Waha présentent les valeurs extrêmes pour la surface de la feuille étendard et le poids spécifique foliaire. Les valeurs moyennes de ces deux caractéristiques sont de 25.2  $\text{cm}^2$  et 6.0  $\text{mg/cm}^2$  pour la surface et le poids spécifique foliaire de Waha et de 41.7  $\text{cm}^2$  et 9.7  $\text{mg/cm}^2$  pour le cultivar Guemgoum Rkhem (Tableau 3.2).

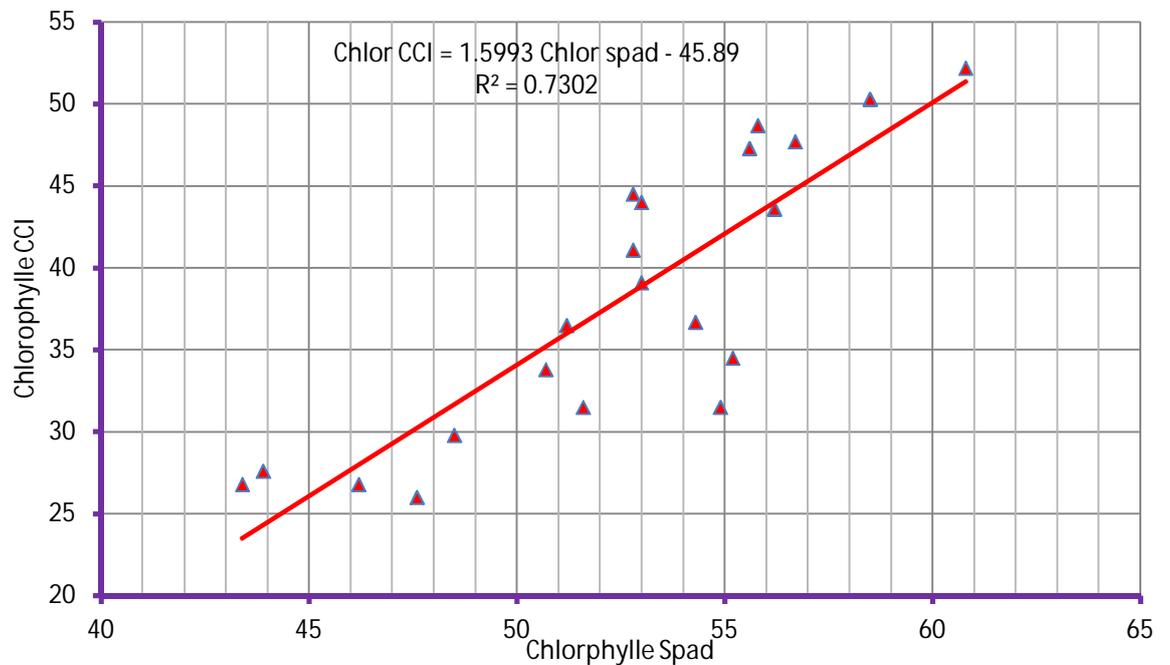


Figure 3.2 : Relation entre les valeurs arbitraires de la chlorophylle mesurées avec le SPAD et le CCI chez les parents et les hybrides F<sub>1</sub>.

Tableau 3.2 : Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides F<sub>1</sub>.

Géotypes	Pro	TRE	Chls	Chlc	PREC	SF	PS	HT	COL	Ext	LE
Waha	11,8	94,2	53,0	39,1	133,6	25,2	6,0	65,0	27,2	20,2	7,6
Waha//ZB/Fg	11,0	93,6	56,2	43,6	136,6	34,9	7,5	68,7	27,2	22,7	8,1
Waha/Mexicali <sub>75</sub>	14,3	93,2	52,8	41,1	139,6	31,2	7,5	62,6	25,9	19,5	8,1
Waha/Ofanto	13,7	76,9	56,7	47,7	135,0	30,7	5,5	66,5	27,0	20,7	8,5
Waha/Gta dur	12,2	90,3	54,3	36,7	136,6	32,5	6,3	64,7	27,2	20,8	8,5
Waha /Guemgoum	16,1	95,2	47,6	26,0	139,3	31,8	7,5	92,4	34,6	23,9	9,9
ZB/Fg	14,0	96,5	52,8	44,5	138,0	33,1	7,1	58,8	23,4	21,0	7,2
ZB/Fg//Mexicali <sub>75</sub>	9,8	96,3	51,2	36,5	139,0	38,1	9,4	64,8	27,0	22,9	8,4
ZB/Fg//Ofanto	14,3	89,2	55,6	47,3	134,6	39,4	8,9	67,0	27,2	20,9	8,1
ZB/Fg//Gta dur	9,5	95,6	51,6	31,5	138,0	36,6	9,1	69,1	28,3	22,6	8,5
ZB/Fg//Guemgoum	11,1	95,8	43,9	27,6	140,6	37,4	7,2	81,5	33,7	23,6	9,3
Mexicali <sub>75</sub> (Mex <sub>75</sub> )	10,8	96,8	55,2	34,5	138,6	40,8	9,7	69,6	27,9	21,6	9,3
Mex <sub>75</sub> /Ofanto	8,3	93,4	55,8	48,7	135,3	37,8	6,0	65,0	29,1	21,2	8,0
Mex <sub>75</sub> /Gta dur	9,8	95,2	53,0	44,0	139,6	37,0	8,4	59,0	24,4	20,7	9,0
Mex <sub>75</sub> /Guemgoum	9,7	94,8	46,2	26,8	140,6	39,7	7,5	88,7	32,6	23,4	9,8
Ofanto	15,3	95,2	60,8	52,2	131,6	38,0	7,6	66,9	27,7	18,5	8,1
Ofanto/Gta dur	11,8	95,0	58,5	50,3	135,0	41,3	9,6	68,4	28,4	20,2	9,0
Ofanto/Guemgoum	10,4	90,0	50,7	33,8	137,6	34,7	7,3	85,9	32,4	21,5	9,0
Gta Dur	9,7	95,9	54,9	31,5	137,3	40,7	8,3	72,8	31,5	23,3	9,5
Gta dur/Guemgoum	8,4	94,7	43,4	26,8	143,3	29,2	8,2	75,7	28,1	24,7	9,2
Guemgoum Rkhem	6,6	94,9	48,5	29,8	147,0	41,7	9,7	99,3	31,0	27,8	9,7
Ppds <sub>5%</sub>	7,6	3,7	3,1	5,3	1,6	4,6	3,3	4,2	4,3	0,7	0,7

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi.

La moyenne de la hauteur de la végétation par plante, la plus élevée, est mesurée chez Guemgoum Rkhem avec une valeur de 99.3cm et la plus faible hauteur, de 58.8 cm, est observée chez Zenati bouteille/Flamingo. L'hybride Waha/Guemgoum Rkhem présente le col le plus long avec une valeur moyenne de 34.6 cm. Par contre, l'hybride Mexicali<sub>75</sub>/(gaviota/durum) présente le col le moins long, avec une moyenne de 24.4 cm. L'extrusion du col de l'épi, la plus longue, est observée chez Guemgoum Rkhem avec une valeur moyenne de 27.8 cm ; alors que l'extrusion la plus faible est mesurée chez le cultivar Ofanto avec une valeur de 18.5 cm (Tableau 3.2).

Ces trois variables sont une estimation de la croissance de la tige en hauteur, mesurée à différents niveaux. Les données de cette étude indiquent la présence d'une corrélation significative au seuil de 1%, entre la hauteur et le col de l'épi ( $r = 0.8539^{**}$ ) et aussi entre la hauteur et l'extrusion ( $r = 0.7534^{**}$ ). Par contre, la corrélation entre l'extrusion et la longueur du col n'est pas significative ( $r = 0.539^{ns}$  vs  $r$  5% seuil = 0.549). Ces résultats suggèrent que la longueur du col et à degré moindre celle de l'extrusion peuvent être prédites par la mesure de la hauteur de la végétation (Figure 3.3).

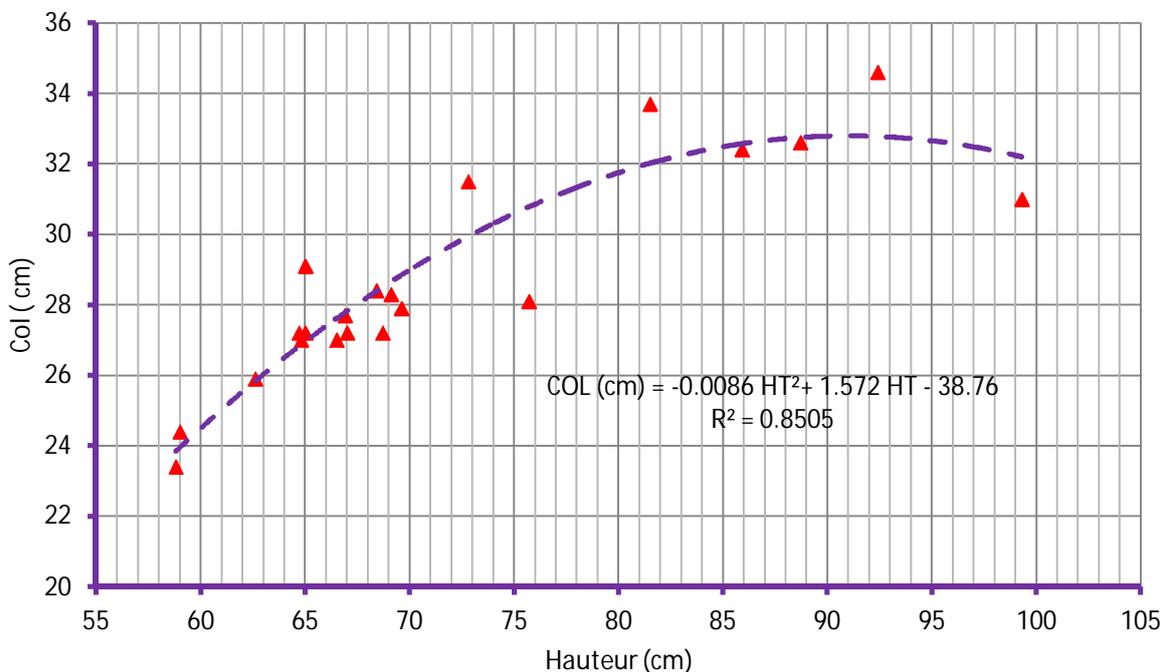


Figure 3.3 : Relation entre les valeurs moyennes de la hauteur de la plante et la longueur du col de l'épi chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

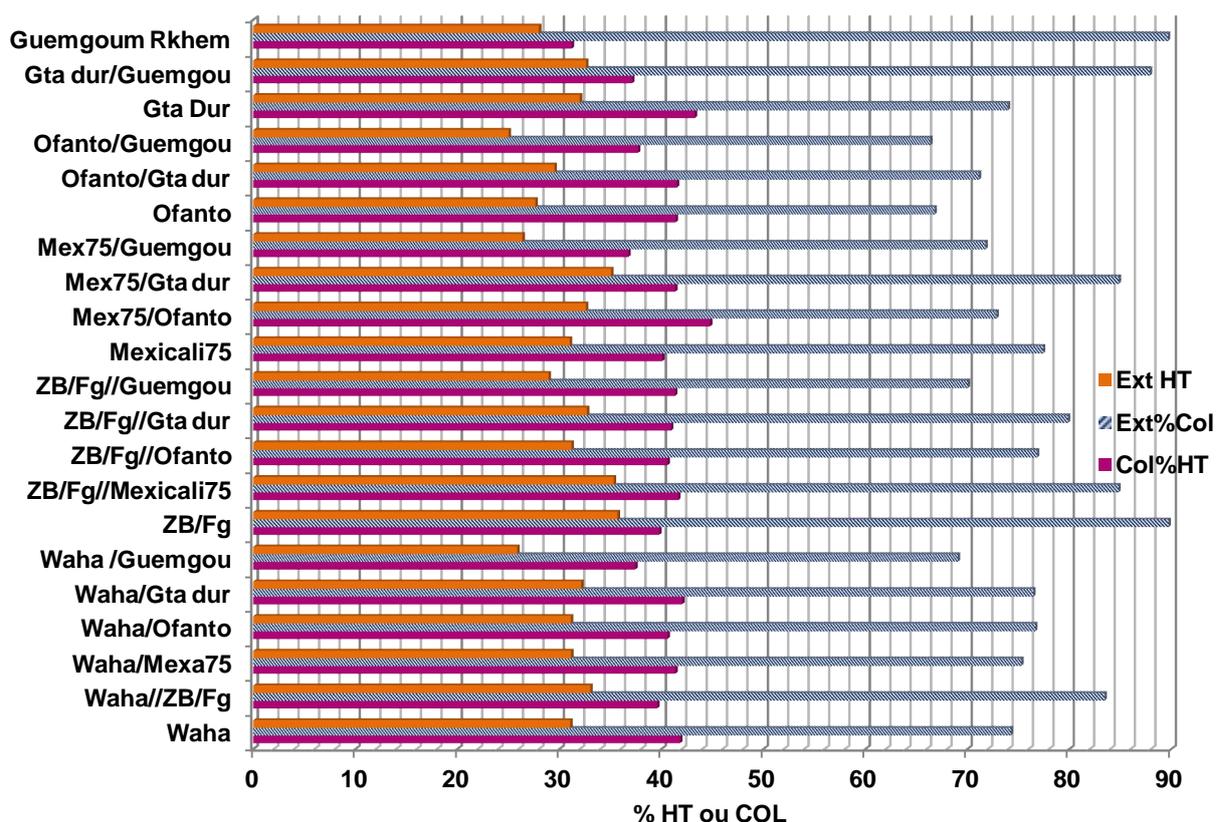


Figure 3.4 : Valeurs du col et de l'extrusion en fonction de celles de la hauteur de la plante chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

Par contre, l'extrusion n'est pas faiblement prédite par la mesure de la longueur du col (Figure 3.4.). En effet, la longueur de l'extrusion représente chez certains génotypes près de 90% de la valeur du col de l'épi alors que chez d'autres génotypes, elle représente moins de 70% (Figure 3.4).

Comme caractères importants dans la tolérance aux stress abiotiques, notamment la sécheresse et les hautes températures, la mesure de la hauteur peut représenter celle du col ; alors que celle du col ne l'est pas pour l'extrusion. Selon YOSHIDA *et al.* [105] la hauteur de la végétation est liée à la profondeur du système racinaire. Le col est le siège de stockage et de transfert d'assimilats vers le grain [106] ; alors que l'extrusion est indicatrice de l'intensité de la compétition qui s'instaure entre la croissance concomitante du col et celle de l'épi [107, 108]. L'épi le plus long est mesuré chez l'hybride Waha /Guemgoum Rkhem dont la valeur moyenne est de 9.9 cm, alors que l'épi le plus court, avec une valeur moyenne de 7.2 cm, est observé chez le cultivar ZB/Fg (Tableau 3.2).

La meilleure capacité d'accumulation de la matière sèche mesurée par plante est notée chez le croisement réalisé entre le cultivar Mexicali<sub>75</sub> et la variété population locale Guemgoum Rkhem avec une valeur moyenne de 94.2 g. La valeur moyenne la plus faible, 36.1 g, est mesurée chez l'hybride dont les parents sont des variétés améliorées : Waha et Ofanto (Tableau 3.3). Guemgoum Rkhem affiche la meilleure valeur moyenne de la production de paille, alors que la plus faible valeur moyenne est mesurée chez le cultivar Waha avec respectivement 55.8 g et 17.0 g. L'indice de récolte est un indicateur de la capacité de la plante à répartir la biomasse produite entre le grain et la paille [109]. Guemgoum Rkhem, qui se distingue par la meilleure biomasse aérienne produite par plante, affiche aussi la plus faible valeur de l'indice de récolte, soit 19.8%.

Cette variété est donc plus productrice de paille que de grain. C'est une variété à destination fourragère, intéressante pour les régions où la production animale notamment ovine est importante. Elle l'est aussi pour les régions cherchant à adopter la pratique du semis direct pour conserver l'humidité du sol grâce à la présence du couvert végétal [110]. Le cultivar Ofanto et l'hybride Ofanto//(gaviota/durum) présentent les meilleures valeurs de l'indice de récolte avec des moyennes de 41.3 et 41.0%, respectivement (Tableau 3.3).

L'étude des corrélations entre ces trois variables indique que la biomasse est significativement liée à la paille produite par les parents et les hybrides ( $r = 0.8922^{**}$ ), alors que la paille produite est négativement et significativement liée à l'indice de récolte ( $r = -0.6354^{**}$ ). Par contre, la biomasse aérienne n'est pas significativement liée à l'indice de récolte ( $r = -0.2528^{ns}$ ). Ces résultats suggèrent que, dans le présent diallele, la biomasse est une estimée de la paille produite ( $R^2 = 0.8249$ ). En effet, la paille produite peut être bien prédite à partir de la mesure de la biomasse aérienne accumulée par plante (Figure 3.5). Il en est de même, quoiqu'à un degré moindre, de la relation entre l'indice de récolte et la paille produite qui est négative. Une production de paille élevée est suggestive d'un faible indice de récolte (Figure 3.6). En ce qui concerne la morphologie de la plante, seule la variété Guemgoum Rkhem présente des valeurs élevées simultanément pour plusieurs caractères hormis l'indice de récolte et le nombre de grains par épis (Tableaux 3.2 et 3.3).

Tableau 3.3 : Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides F<sub>1</sub>.

Génotype	BIO	PLL	HI	PNE	NE	NGE	PMG	RDT
Waha	44,7	17,0	40,3	27,7	12,2	54,9	35,1	17,7
Waha//ZB/Fg	85,2	33,1	38,9	52,1	19,8	60,3	40,8	33,2
Waha/Mexa <sub>75</sub>	52,5	21,9	36,2	30,5	13,6	59,4	35,8	18,7
Waha/Ofanto	36,1	17,7	38,3	31,0	12,1	70,3	39,4	15,0
Waha/Gta dur	61,1	23,6	39,5	37,5	14,6	67,2	36,9	24,3
Waha /Guemgoum	82,6	40,6	31,6	41,9	15,6	49,7	44,8	26,4
ZB/Fg	62,1	27,7	34,1	34,4	15,1	53,0	38,7	20,9
ZB/Fg//Mexicali <sub>75</sub>	61,7	25,9	36,3	35,8	14,0	62,5	39,1	22,6
ZB/Fg//Ofanto	73,8	28,6	39,9	45,2	15,8	61,5	41,6	29,4
ZB/Fg//Gta dur	80,7	34,0	35,3	46,7	15,9	71,6	39,5	29,0
ZB/Fg//Guemgoum	80,6	41,0	29,7	39,6	15,3	43,5	45,7	24,7
Mexicali <sub>75</sub> (Mex <sub>75</sub> )	76,9	32,9	37,2	44,0	14,9	72,1	38,6	28,6
Mex <sub>75</sub> /Ofanto	58,4	22,7	38,9	35,6	11,3	55,2	43,6	22,8
Mex <sub>75</sub> /Gta dur	41,6	17,5	34,6	24,1	9,0	59,2	36,8	14,6
Mex <sub>75</sub> /Guemgoum	94,2	48,3	28,7	45,8	16,6	51,2	44,7	28,6
Ofanto	58,0	22,4	41,3	35,6	12,8	61,8	41,9	24,2
Ofanto/Gta dur	84,8	33,4	41,0	51,3	16,4	75,5	41,4	34,0
Ofanto/Guemgoum	48,2	20,3	33,7	27,9	8,8	47,6	48,0	16,7
Gta Dur	92,6	37,6	38,8	54,9	20,1	69,9	37,3	36,2
Gta dur/Guemgoum	39,7	19,7	30,6	20,0	8,9	40,4	42,2	12,4
Guemgoum Rkhem	88,4	55,8	19,8	32,5	13,5	39,9	50,6	17,4
Ppds <sub>5%</sub>	24,0	14,7	4,7	13,9	4,5	12,7	6,9	11,5

BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la palle/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

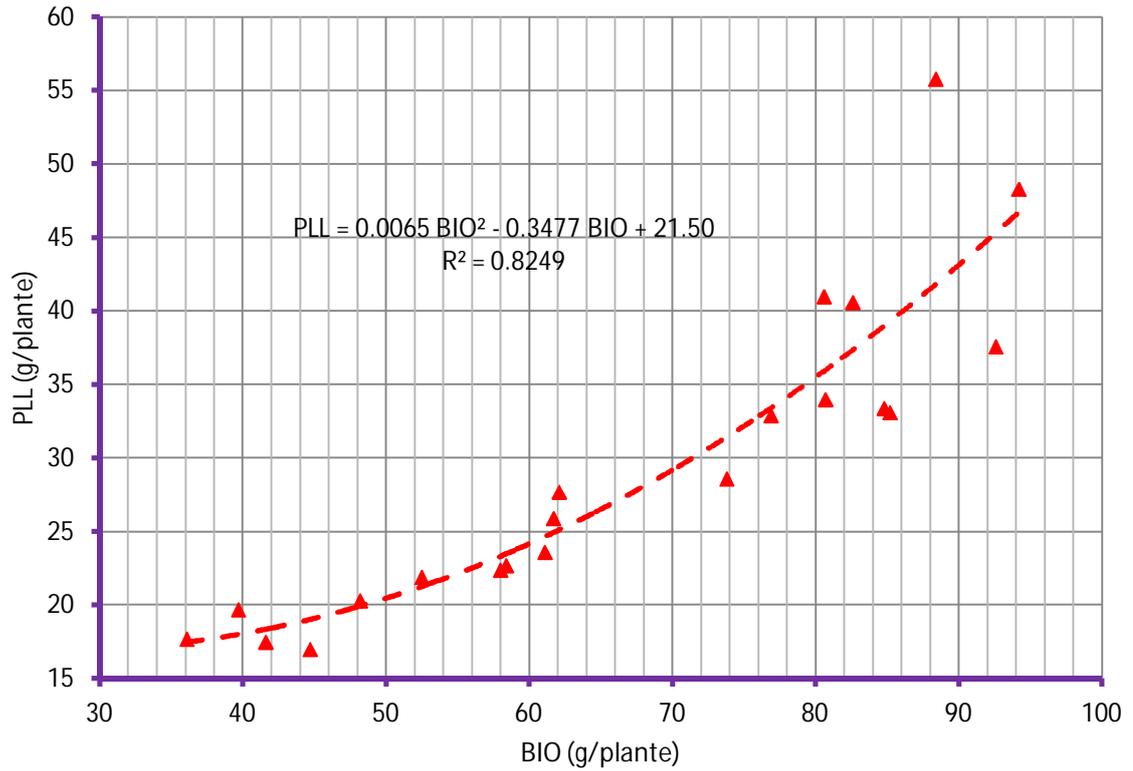


Figure 3.5 : Relation entre la biomasse aérienne et la paille produites par plante chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

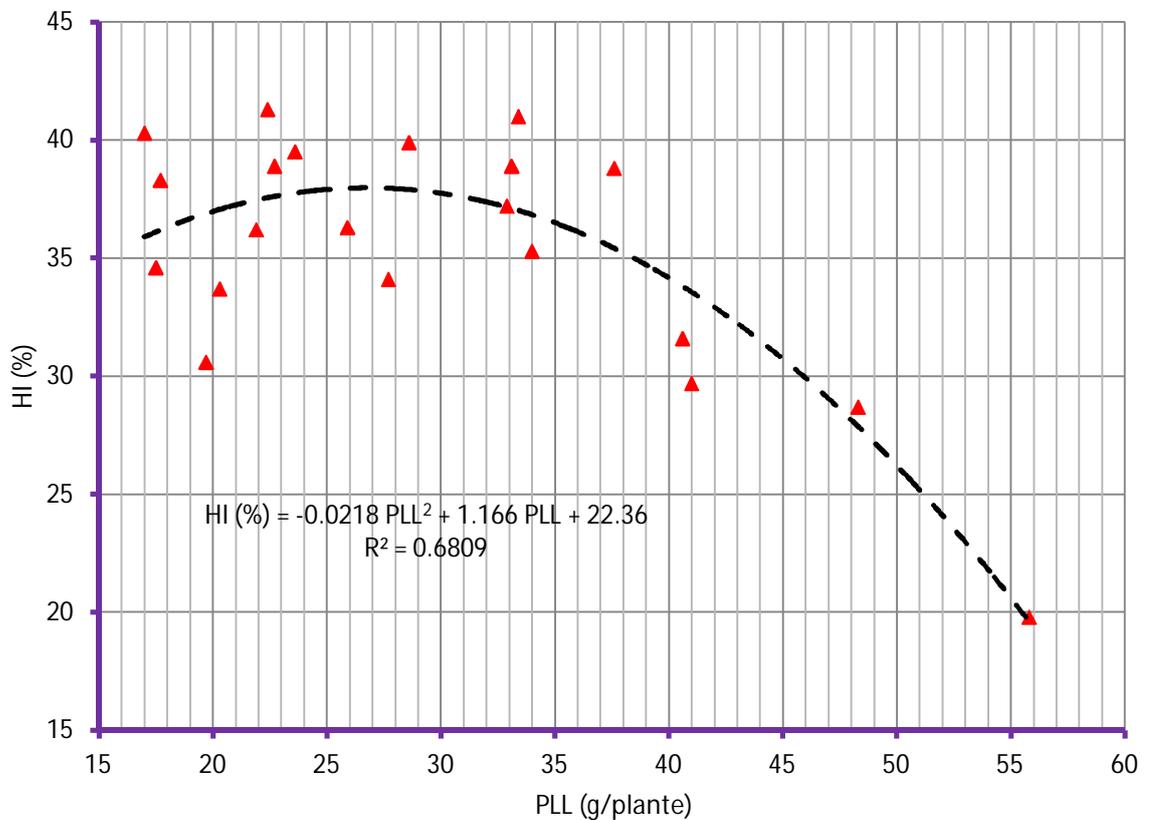


Figure 3.6 : Relation entre la paille produite et l'indice de récolte chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

### 3.2.2.3. Le rendement et ses composantes

L'hybride Waha//ZB/Fg et le cultivar (gaviota/durum) présentent les meilleures valeurs moyennes pour le poids des épis par plante, avec des valeurs respectives de 52.1 et 54.9 g. Les valeurs élevées de ces variables sont associées à des valeurs moyennes élevées pour le nombre d'épis par plante, qui sont de 19.8 et 20.1 épis par plante (Tableau 3.3). Les valeurs les plus faibles pour ces deux variables sont mesurées chez l'hybride (gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem et l'hybride Mexicali<sub>75</sub> / (gaviota/durum), avec respectivement 20.0 g et 8.9 épis pour le premier hybride et 24.1 g et 9.0 épis pour le second hybride, ci-dessus cités (Tableau 3.3).

Le poids des épis est significativement lié au nombre d'épis produits par plante ( $r = 0.9193^{**}$ ). Ces deux caractères ne sont pas liés à la longueur de l'épi ( $r = 0.181^{ns}$  et  $0.089^{ns}$ ) et sont liés positivement à la biomasse produite par plante ( $r = 0.8504^{**}$  pour le poids des épis et  $r = 0.8262^{**}$  pour les épis). Ces résultats indiquent que la biomasse est constituée, en partie, par le poids des épis, qui est lui-même déterminé par le nombre d'épis produit par plante (Figure 3.7). Ils suggèrent aussi que la sélection sur la base du nombre d'épis devrait être efficace dans l'identification des lignées possédant la capacité de produire une biomasse aérienne élevée.

Plusieurs hybrides et cultivars se distinguent par des valeurs moyennes élevées du nombre de grains par épi. Ces hybrides sont Waha/Ofanto avec 70.3 graines par épi, Zb/Fg//(gaviota/durum) avec 71.6 graines par épi et Ofanto//(gaviota/durum) avec 75.5 graines par épi. Pour les cultivars, seul Mexicali<sub>75</sub> présente une valeur élevée du nombre de grains par épi de 72.1 graines par épi. L'hybride (gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem et Guemgoum Rkhem présentent les plus faibles valeurs de 40.4 et 39.9 graines par épi (Tableau 3.3). Le poids de 1000 grains varie de 35.1 g valeur mesurée chez Waha à 50.6 g valeurs présenté par le cultivar Guemgoum Rkhem (Tableau 3.3).

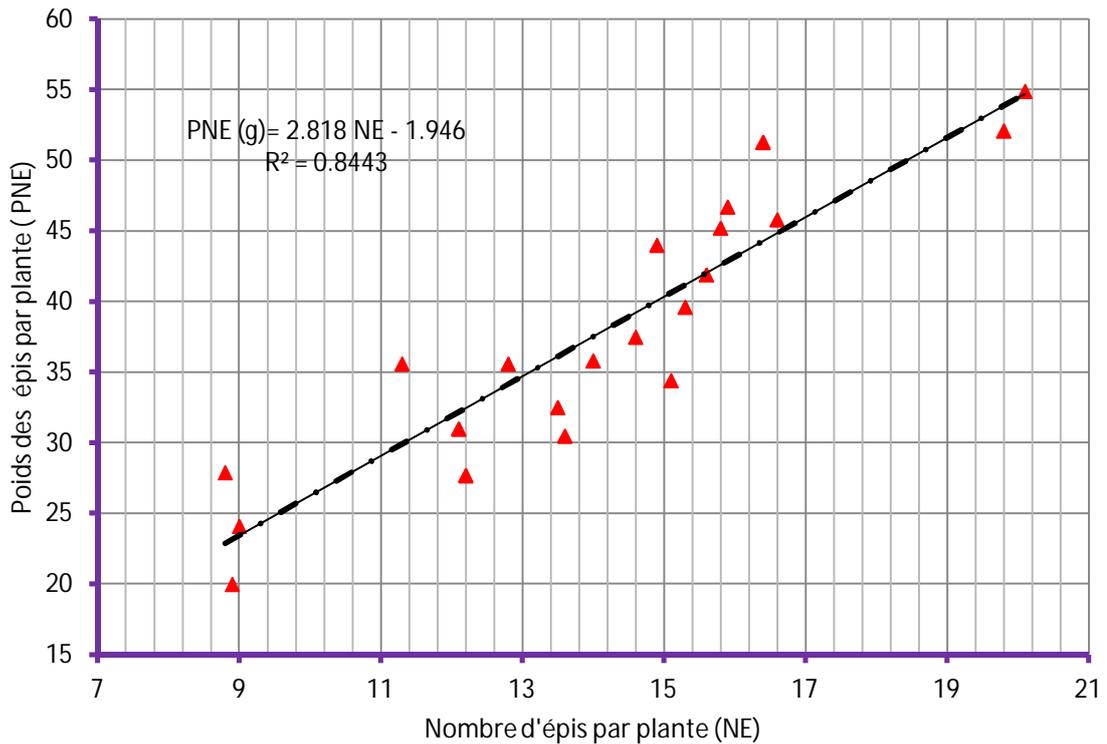


Figure 3.7 : Relation entre le nombre d'épis et le poids des épis produit par plante chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

Le rendement grain varie de 12.4 g, valeur prise par l'hybride (Gaviota/durum)/Guemgoum Rkhem, à 36.2 g, valeur caractéristique du cultivar (Gaviota/durum) (Tableau 3.3). Ce résultat indique que, paradoxalement, une lignée de bonne valeur propre comme l'est (Gaviota/durum), ne donne nécessairement pas une descendance de bonne valeur propre. Par contre, ceci semble vrai pour ce qui est de la valeur propre de Guemgoum Rkhem.

Le rendement par plante est significativement lié à la biomasse aérienne ( $r = 0.817^{**}$ ), au poids des épis ( $r = 0.981^{**}$ ) et au nombre d'épis produit par plante ( $r = 0.886^{**}$ ). Le nombre de grains par épi contribue positivement à la matérialisation de l'indice de récolte ( $r = 0.739^{**}$ ) et négativement au poids de 1000 grains ( $r = -0.623^{**}$ ). Chez l'ensemble des parents et des hybrides, le rendement grain est largement déterminé par le poids des épis (Figure 3.8).

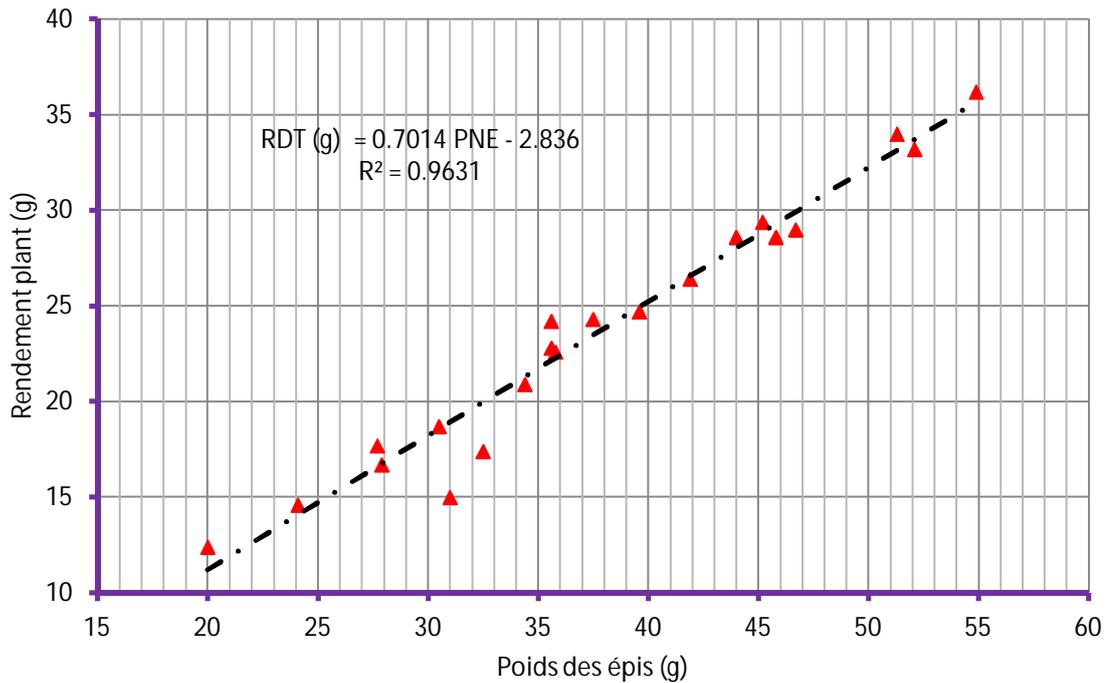


Figure 3.8 : Relation entre le poids des épis et le rendement grain par plante chez les parents et les hybrides  $F_1$ .

La relation entre deux variables, l'une dépendante (DV) et l'autre indépendante (IV), est biaisée par le fait que cette relation ne tient pas compte des effets directs et indirects des autres variables indépendantes sur la variable dépendante. En effet, et à titre d'exemple, dans la relation entre le poids des épis et le rendement, on a, entre autres, les effets directs et indirects du nombre d'épis via le nombre de grains par épi, le poids des épis, le poids de 1000 grains et la biomasse aérienne [111]. La régression progressive (stepwise regression) apporte l'avantage de sélectionner tout un groupe de variables indépendantes qui expliquent une grande part de la variation de la variable dépendante [112].

L'application de la régression progressive, prenant la biomasse aérienne, le poids des épis et le rendement grain par plante comme variables dépendantes fournit des résultats plus complexes (Tableau 3.4). En effet, la variation de la biomasse aérienne produite par plante est largement expliquée ( $R^2 = 0.994$ ) par trois variables mesurées, parmi les 18 disponibles, et qui sont la paille, le poids des épis et la teneur relative en eau (Tableau 3.4). Ce résultat est important car il intègre une variable qui donne une mesure du degré de tolérance au stress hydrique et thermique. Le signe positif des coefficients de régression de ces

variables indique que l'augmentation des valeurs de ces variables a un effet positif sur la biomasse aérienne produite par plante. Les valeurs des coefficients de régression indiquent que l'effet, sur la biomasse aérienne, du poids des épis est plus important que celui de la paille suivi de celui de la teneur relative en eau (Tableau 3.4).

La variation du poids des épis est expliquée ( $R^2= 0.944$ ) par quatre variables parmi les 18 variables soumises à l'analyse. Ces variables sont le nombre d'épis, la précocité au stade épiaison, la surface de la feuille étendard et la longueur de l'épi (Tableau 3.4). Le nombre et la longueur des épis ont des effets positifs les plus importants, confirmant la relation indiquée par la figure 3.7. La durée à l'épiaison a un effet négatif, suggérant que la capacité de tallage-épis est associée à la précocité à l'épiaison. Ce résultat intègre aussi des variables, telles que la précocité à l'épiaison, qui permettent de sélectionner pour l'adaptation au milieu en esquivant les stress abiotiques qui caractérisent l'environnement de production. La variation du rendement en grain par plante est expliquée ( $R^2 = 0.993$ ) par le poids des épis, l'indice de récolte, la teneur relative en eau et la hauteur de la plante, parmi les 18 variables soumise à l'analyse (Tableau 3.4).

Dans le cas où on soumet à l'analyse uniquement les variables qui sont facilement mesurables sur champs, en évitant celles qui demandent du temps et sont associées à des erreurs importantes, telles que la biomasse aérienne, le poids des épis, celui de la paille, l'indice de récolte, la longueur du col, celle de l'extrusion et celle de l'épi ; la variation du rendement est expliquée par le nombre d'épis, la surface de la feuille étendard, la précocité à l'épiaison et le contenu en chlorophylle (Tableau 3.4). Parmi ces quatre variables, deux (la surface de la feuille étendard et le contenu en chlorophylle) donnent une indication sur la capacité photosynthétique de la plante, une, sur la capacité de rendement (le nombre d'épis) et la quatrième sur la capacité d'esquive des stress (la précocité à l'épiaison). Ainsi, ce dernier modèle permet d'identifier les hybrides et les lignées parentales qui sont performantes en terme de rendement grain et sont résilientes vis-à-vis des stress. Les variables retenues par ce modèle peuvent servir de critères de sélection, sous la forme d'un index [113], notamment si l'étude

généétique montre qu'ils sont hautement hérithables et sous contrôle génétique de type additif.

Tableau 3.4 : Régression progressive de la biomasse aérienne, le poids des épis et le rendement grain sur les variables mesurées chez les parents et les hybrides F<sub>1</sub>.

Source	ddl	SCE	CME	F	Prob.>F
Biomasse					
Régression	3	6874.4	2291.5	1121.2	0.000
Résiduelle	17	34.7	2.0		
Totale	20	6909.2			
Variables retenues		b	se <sub>b</sub>	t	Prob. >t
PNE		1.011	0.041	24.9	0.000
PLL		0.978	0.038	25.7	0.000
TRE		0.572	0.079	7.2	0.000
R <sup>2</sup> =		0.994		constante =	-53.8
Poids des épis (PNE)					
Régression	3	1713.2	428.3	25.7	0.000
Résiduelle	17	79.9	4.9		
Totale	20	1793.1			
Variables retenues		b	se <sub>b</sub>	t	Prob. >t
NE		2.390	0.178	13.4	0.000
LE		2.436	0.903	2.7	0.016
PREC		-0.823	0.186	-4.4	0.000
SF		0.504	0.132	3.8	0.001
R <sup>2</sup> =		0.944		constante =	78.3
Rendement (RDT)					
Régression	3	910.5	227.6	685.3	0.000
Résiduelle	17	5.3	0.3		
Totale	20	915.8			
Variables retenues		b	se <sub>b</sub>	t	Prob >t
PNE		0.632	0.017	37.7	0.000
HI		0.287	0.047	6.04	0.000
TRE		0.258	0.033	7.8	0.001
HT		0.057	0.021	2.7	0.014
R <sup>2</sup> =		0.993		constante =	-38.7
Rendement (RDT)					
Régression	3	855.8	213.9	57.0	0.000
Résiduelle	17	59.9	3.7		
Totale	20	915.8			
Variables retenues		b	se <sub>b</sub>	t	Prob >t
NE		1.468	0.165	8.9	0.000
SF		0.572	0.113	5.0	0.001
PREC		-0.921	0.202	-4.6	0.000
Chl <sub>c</sub>		-0.207	0.079	-2.6	0.019
R <sup>2</sup> =		0.918		constante =	117.3

### 3.2.3. Analyse des aptitudes à la combinaison

L'analyse de la variance des aptitudes générale et spécifique à la combinaison montre que les effets d'AGC sont significatifs pour la majorité des caractères étudiés, à l'exception du poids des épis, du nombre d'épis et du rendement grain qui montrent plutôt un effet d'ASC significatif (Tableau 3.5). La teneur relative en eau foliaire, le contenu en chlorophylle, la surface de la feuille étendard, la longueur du col et de l'épi ainsi que la biomasse aérienne et la paille produite par plante présentent des effets d'AGC et d'ASC significatifs. Ces résultats indiquent que des actions géniques de nature additive et non additive sont impliquées dans la transmission de ces caractères.

QUICK [114] ainsi que SAYED [93] mentionnent que le rapport de l'effet d'aptitude générale à la combinaison sur celui de l'aptitude spécifique à la combinaison (AGC/ASC) peut être utilisé comme indicateur de la nature des actions géniques mises en jeu dans le contrôle du caractère considéré. Dans le cas de la présente étude, ce rapport varie de 0.5 à 42.4, pour les caractères analysés (Tableau 3.5). Ce ratio montre la prédominance de l'action des gènes de nature non additive pour la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis et le rendement grain, pour lesquels la valeur est inférieure à l'unité. Les autres caractères mesurés, notamment le contenu en chlorophylle, la précocité à l'épiaison, la hauteur de la plante, la longueur de l'extrusion, l'indice de récolte et le poids de 1000 grains présentent un rapport largement supérieur à l'unité, suggérant l'action génique de nature additive (Tableau 3.5).

Les résultats de la présente étude rejoignent ceux obtenus par SENNER [115] ; YUCEL *et al.* [116] ; CHOWDHARY *et al.* [117] ; et OETTLER *et al.* [118]. Ces différents auteurs rapportent que l'action de nature additive est plus importante dans le contrôle des caractères agronomiques que l'action de nature non additive. Par contre, MEKLIČE *et al.* [119] ; HASSAN *et al.* [120] ainsi que HASSAN [121], parmi d'autres rapportent plutôt la prédominance de l'action génique de nature non additive.

Tableau 3.5 : Carrés moyens de l'analyse de variance des aptitudes générale et spécifique à la combinaison des caractères mesurés.

Source	AGC	ASC	Erreur	AGC/ASC	Baker ratio
ddl	5	15	40	-----	-----
Pro	11,5*	4,5	3,98	2.6	0,84
TRE	24,8*	16,8*	5,73	1.5	0,75
Chls	63,9*	6,5**	2,46	9.8	0,95
Chlc	222,8**	21,8*	10,76	10.2	0,95
Prec	41,7**	1,5	1,24	27.8	0,98
SF	48,1**	10,7*	5,23	4.5	0,90
PS	2,8*	1,3	1,1	2.3	0,82
HT	427,2**	23,5	14,56	18.2	0,97
Col	17,1**	6,1*	2,67	2.8	0,85
Ext	13,9**	1,11	0,63	12.4	0,96
LE	1,6**	0,2*	0,08	9.1	0,95
BIO	283,8*	365,3**	101,09	0.8	0,61
PLL	214,6**	78,9*	37,80	2.7	0,84
HI	100,8**	2,4	3,89	42.4	0,99
PNE	50,9	102,1*	37,42	0.5	0,50
NE	8,2	10.0*	4,57	0.8	0,62
NGE	314,5**	44.1	28,34	7.1	0,93
PMG	59,6*	2,0	8,27	29.8	0,98
RDT	33,1	50.3*	28,96	0.7	0,57

BAKER [91] mentionne que lorsque le carré moyen des écarts de l'ASC n'est pas important en valeur, il est alors possible de prédire la performance de la descendance sur la base de l'AGC des parents croisés. Dans le cas où le carré moyen de l'ASC est significatif au même titre que celui l'AGC, BAKER [91] propose l'utilisation du ratio  $[2CME_{AGC} / (2CME_{AGC} + CME_{ASC})]$  pour déterminer la nature de l'action des gènes mis en cause dans le contrôle du caractère étudié. Plus ce ratio dit Baker ratio est proche de l'unité, plus les effets géniques de nature additive sont prépondérants dans le contrôle du caractère étudié.

Dans cette étude, le rapport de Baker varie de 0.50 à 0.99. Il est supérieur à 0.80 pour presque l'ensemble des caractères analysés hormis la teneur relative en eau, la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis et le rendement en grain pour lesquels ce ratio varie de 0.50 à 0.75 (Tableau 3.5). Ce ratio départage les caractères analysés en deux groupes ; ceux dont le contrôle génétique est de nature additive et ceux dont le contrôle génétique est plutôt de nature non additive. Ces derniers sont des caractères liés à la production de biomasse. ZARE KOHAN et HEIDARI [122] rapportent des résultats similaires

pour le blé tendre et notamment pour le rendement grain qui apparait sous contrôle génétique de nature non additive.

### 3.2.3.1. Analyse de l'aptitude générale à la combinaison

Le concept de l'aptitude à la combinaison réfère à la capacité ou l'aptitude d'un génotype à transmettre ses performances (ses gènes) à sa descendance. L'aptitude générale à la combinaison (AGC) est la performance moyenne d'un géniteur dans une série de combinaisons hybrides, tandis que l'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) réfère à la performance d'une combinaison spécifique d'une lignée dans un croisement particulier [91]. L'aptitude générale à la combinaison est associée à des effets géniques additifs, alors que l'aptitude spécifique à la combinaison est liée à des effets géniques de dominance et épistatiques.

La valeur et le signe des effets d'aptitude à la combinaison sont utiles à connaître car ils servent d'aides à la sélection, dans les programmes d'amélioration, des meilleurs parents qui se combinent bien et des meilleures combinaisons hybrides pour les caractères d'intérêts [123]. Les effets d'aptitude générale à la combinaison peuvent être considérés comme les valeurs numériques assignées aux parents en relation avec leurs performances moyennes dans les croisements considérés [124]. Les effets d'aptitude générale à la combinaison représentent la composante fixable de la variance génétique. Ils sont importants pour la sélection de lignées supérieures. Les effets d'aptitude spécifique à la combinaison représentent la composante non-fixable de la variance génétique, ils fournissent des informations sur les performances des combinaisons hybrides [91].

Les résultats de la présente étude indiquent que pour le contenu en proline seul le cultivar Waha présente un effet d'aptitude générale à la combinaison significatif (Tableau 3.6). Ce cultivar est donc conseillé comme géniteur dans les situations où l'on cherche à améliorer le contenu en proline de la descendance, pour peu que le contenu en proline soit favorable à l'expression du rendement en situation de contraintes. Pour la teneur relative en eau, aucun parent ne présente un effet positif et significatif d'aptitude à la combinaison. Seul Ofanto présente un

effet significatif d'aptitude à la combinaison mais de signe négatif (Tableau 3.6). Ces résultats suggèrent qu'il est difficile d'améliorer le contenu relatif en eau, en utilisant le jeu des parents croisés.

Pour le contenu en chlorophylle, deux géniteurs contrastés apparaissent. Ofanto présente un effet d'aptitude à la combinaison positif et significatif, à l'inverse de Guemgoum Rkhem qui présente un effet significatif et de signe négatif (Tableau 3.6). Dans le cas où la sélection se fait pour améliorer le contenu en chlorophylle, il est judicieux d'utiliser Ofanto comme parent donneur ; alors que dans les situations où la sélection se fait dans le sens de la réduction du contenu en chlorophylle, notamment au cours de la période de remplissage [72], il serait intéressant d'utiliser le cultivar Guemgoum Rkhem comme donneur de cette caractéristique.

Pour la précocité au stade épiaison, deux géniteurs Waha et Ofanto présentent des effets significatifs et de signe négatifs, avec des valeurs de -1.40 et -3.11 jours. Ce qui suggère la capacité de ces génotypes à réduire de la durée la phase allant de la levée au stade épiaison. Un autre géniteur, le cultivar Guemgoum Rkhem, présente, quant à lui, un effet significatif mais de signe positif, dont la valeur est de 3.72 jours, ce qui suggère la capacité de ce cultivar à augmenter la durée de la phase levée-épiaison chez sa descendance.

Pour la surface de la feuille étendard Waha et Mexicali<sub>75</sub> s'opposent pour la capacité d'améliorer cette caractéristique. Waha présente un effet hautement significatif d'aptitude générale à la combinaison et de signe négatif. Ce génotype porte les gènes qui induisent la réduction de la surface de la feuille étendard, d'une valeur de -4.89 cm<sup>2</sup> (Tableau 3.6). A l'inverse, Mexicali présente un effet d'AGC positif et significatif d'une valeur de 1.83 cm<sup>2</sup>. Ce génotype est apte à augmenter sensiblement la surface de la feuille étendard. Le cultivar Waha présente aussi un effet d'AGC significatif et de signe négatif pour le poids spécifique foliaire, d'une valeur de -1.04mg/cm<sup>2</sup>.

Tableau 3.6 : Effets de l'AGC des parents pour les variables mesurées.

Parents	Waha	Zb/Fg	Mexicali	Ofanto	Gta Dur	Guemgoum	se <sub>(qi)</sub>	se <sub>(qi-gi)</sub>
Pro	1,41*	0,51	-0,75	1,21	-1,05	-1,33	0,614	1,00
TRE	-2,09	1,15	1,55	-2,40*	1,03	0,77	1,08	1,98
Chls	0,75	-0,45	0,24	3,94**	0,37	-4,85**	0,51	0,78
Chlc	0,91	1,06	-0,11	8,16**	-1,82	-8,20**	1,06	1,64
Prec	-1,40*	-0,11	0,72	-3,11*	0,18	3,72**	0,36	0,56
SF	-4,89**	0,24	1,83*	1,17	0,93	0,71	0,71	1,14
PS	-1,04*	0,18	0,42	-0,28	0,44	0,28	0,28	0,58
HT	-2,39*	-4,43*	-3,09*	-2,21	-2,70*	14,83**	1,13	1,91
Col	-0,59	-1,25*	-0,78	-0,11	-0,13	2,86**	0,53	0,82
Ext	-0,75*	0,10	-0,37	-1,54**	0,21	2,35**	0,26	0,40
LE	-0,33*	-0,50**	0,12	-0,27*	0,28*	0,71**	0,09	0,14
BIO	-7,65*	4,78	-0,72	-6,32*	3,14	6,76*	3,08	7,09
PLL	-4,55*	1,33	-0,65	-4,97*	-0,47	9,29**	1,98	3,07
HI	2,09*	0,02	0,12	3,28*	1,30	-6,80**	0,64	0,99
PNE	-2,01	2,91	-0,62	-0,26	3,07*	-3,08*	1,26	4,11
NE	0,16	1,53	-0,55	-1,11	0,78	-0,81	1,34	2,07
NGE	0,99	-0,45	2,85*	3,11*	5,60*	-12,09**	1,12	2,66
PMG	-2,46*	-0,41	-1,28	1,29	-2,01*	4,87**	0,93	1,44
RDT	-1,59	1,86	-0,16	0,05	2,62	-2,79	1,77	2,74

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la paille/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

Pour la hauteur de la végétation les cultivars récents Waha, Zb/Fg, Mexicali et Ofanto présentent des effets d'AGC significatifs et de signe négatifs. Par contre, la variété locale Guemgoum Rkhem présente un effet d'AGC positif et significatif d'une valeur de 14.83 cm (Tableau 3.6). Cette même variété présente des effets significatifs et positifs pour la longueur du col (2.86 cm), de l'extrusion (2.35 cm), de l'épi (0.71 cm), de la biomasse (6.76 g), de la paille (9.29 g) et du poids de 1000 grains (4.87g) (Tableau 3.6).

Des effets d'AGC significatifs, mais de signes négatifs, sont présentés pour ces caractères, principalement, par les géniteurs Waha et Ofanto (Tableau 3.6). Ces deux géniteurs passent à leurs descendances la capacité de produire moins de paille et de biomasse aérienne. Par contre, ils passent à leurs descendances la capacité de faire une bonne répartition de la biomasse produite entre le grain et la paille. En effet, Waha et Ofanto présentent des effets d'AGC positifs et significatifs pour l'indice de récolte, à l'inverse de Guemgoum Rkhem, qui présente un effet d'AGC significatif mais de signe négatif (Tableau 3.6).

Pour le nombre d'épis et le rendement grain, aucun géniteur étudié ne présente un effet d'AGC significatif. Ceci suggère que les géniteurs utilisés ne diffèrent pas pour les gènes contrôlant ces caractéristiques. Pour le nombre de grains par épi, Guemgoum Rkhem présente un effet significatif et de signe négatif d'une valeur de -12.09 graines, alors que (gaviota/durum), Ofanto et Mexicali<sub>75</sub> présentent des effets d'AGC significatifs et positifs, de valeurs respectives de 5.60, 3.11 et 2.85 graines par épi (Tableau 3.6).

Produire plus de biomasse reste un objectif important pour les régions semi-arides où la culture de la céréale est le plus souvent associée à la pratique de l'élevage ovin, nourri principalement avec de la paille produite. Dans ce contexte, le cultivar Guemgoum Rkhem apparaît comme un géniteur tout indiqué qui combine bien avec les autres géniteurs pour augmenter la biomasse aérienne et la paille produite. La descendance de ce géniteur sera reprise en croisement avec des géniteurs comme Waha et/ou Ofanto pour en améliorer l'indice de récolte.

### 3.2.3.2. Analyse de l'aptitude spécifique à la combinaison

L'aptitude spécifique à la combinaison (ASC) est considérée comme un bon critère pour sélectionner les meilleurs hybrides pour un ou plusieurs caractères d'intérêts. Plusieurs hybrides se distinguent par des effets d'aptitude spécifique à la combinaison significatifs. Ainsi, l'hybride Waha//Zb/Fg présente des effets d'ASC significatifs pour plusieurs caractères à la fois dont la teneur en chlorophylle (3.3 en unité SPAD), le poids spécifique de la feuille étendue (3.72 mg/cm<sup>2</sup>), la longueur de l'extrusion (1.41 cm), la biomasse aérienne (21.1 g par plante), le poids des épis (13.3 g) et le rendement grain avec un écart positif de 9.27 g (Tableau 3.7).

Chez cet hybride, l'effet significatif d'ASC du rendement semble conditionné par des effets significatifs et positifs de la biomasse et du poids des épis ainsi que par une augmentation de la teneur en chlorophylle et du poids spécifique foliaire (Tableau 3.7). Des effets d'ASC significatifs et de signes négatifs sont notés pour plusieurs caractères chez les hybrides ayant Guemgoum Rkhem comme parent commun : Mexicali<sub>75</sub>/Guemgoum Rkhem et (gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem (Tableau 3.7).

Parmi les caractères concernés, figure le rendement en grain qui diminue chez ces deux hybrides de 9.2 et 11 g, respectivement, relativement à la moyenne générale de l'ensemble des hybrides et de leurs parents. Chez l'hybride Mexicali<sub>75</sub>/Guemgoum Rkhem, l'écart négatif du rendement grain est associé à des écarts négatifs de la hauteur de la végétation (-10.0 cm), de la longueur du col de l'épi (-3.2 cm), de la longueur de l'extrusion (-1.6 cm), du poids de la biomasse (-27.1 g) de celui de la paille (-13.0 g) et de celui des épis (-13.3 g) (Tableau 3.7).

Chez l'hybride (gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem, l'écart négatif du rendement grain est associé à des écarts négatifs du contenu en chlorophylle (-4.6 en unité SPAD), de la surface de la feuille étendard (-8.2 cm<sup>2</sup>), de la hauteur de la végétation (-8.4 cm), de la longueur du col de l'épi (-3.3 cm), du poids de la biomasse (-37.0 g), de celui de la paille (-18.0 g), de celui des épis (-17.0 g), et des nombres d'épis (-5.0) et de grains par épi (-11.0) (Tableau 3.7).

L'hybride Waha//(gaviota/durum) ne montre aucun effet d'ASC significatif pour l'ensemble des variables mesurées. Les autres hybrides, hormis ceux-ci-dessus cités, ne présentent pas d'effets significatifs d'ASC pour le rendement grain le nombre d'épi et le poids de 1000 grains (Tableau 3.7). Pour la biomasse aérienne, les hybrides Waha/Ofanto, Waha/Guemgoum Rkhem, Mexicali<sub>75</sub>/Guemgoum Rkhem, Ofanto//(Gaviota/durum) et (Gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem, présentent des effets d'AGC significatifs, dont les valeurs respectives sont de -16.7, 16.6, 21.2, 21.1 et -19.0 g par plante (Tableau 3.7). Pour l'indice de récolte, aucun hybride ne présente d'effet d'ASC significatif.

Tableau 3.7 : Effets de l'ASC des différents hybrides pour les caractères mesurés

Xss	1x2	1x3	1x4	1x5	1x6	2x3	2x4	2x5	2x6	3x4	3x5	3x6	4x5	4x6	5x6	se <sub>ASC(ij)</sub>	se <sub>ASC(ij-kl)</sub>
Pro	-2,3	2,32	-0,29	0,46	4,6*	-1,81	1,22	-1,31	0,52	-3,49	0,59	0,37	0,28	-0,83	-0,55	1,77	2,45
TRE	1,07	0,31	-12**	-2,1	3,1*	0,57	-2,96	-0,07	0,44	0,80	-0,69	-0,95	2,87	-1,77	-0,59	1,52	4,86
Chls	3,3*	-0,67	-0,44	0,64	-0,82	-0,76	-0,41	-0,87	-3,3*	-0,87	0,67	-1,73	1,73	-0,88	-4,6**	1,39	1,92
Chlc	3,52	2,13	0,52	-0,49	-4,1*	-3,42	-0,06	-5,85*	-3,43	2,54	8,0*	-2,99	5,79*	-4,33*	-1,35	1,91	4,02
Prec	0,20	2,36*	1,53	-0,10	-0,97	0,28	-0,10	-0,05	-0,93	-0,26	-0,43	-1,76	-0,05	-0,93	1,45	0,99	1,37
SF	3,72*	-1,58	-1,34	0,66	0,23	1,41	2,17*	-0,31	0,65	-1,04	-1,73	1,34	3,45*	-2,98*	-8,2**	1,03	2,80
PS	0,50	0,32	-0,99	-0,88	0,43	1,20	1,22	0,69	-1,07	-1,95*	-0,45	-1,07	1,66	-0,55	-0,36	0,83	1,43
HT	3,51	-3,91	-0,87	-2,26	7,9*	1,17	1,59	4,24	-0,95	-1,73	-10**	4,92*	1,25	1,25	-8,4*	2,38	3,67
Col	0,46	-2,01*	-0,97	-0,75	3,7*	0,77	-0,05	1,09	3,5*	1,38	-3,2*	1,85*	0,03	0,98	-3,3*	0,85	2,00
Ext	1,41*	-1,41*	1,02	-0,69	0,34	1,44*	0,38	0,31	-0,84	1,13	-1,6*	-0,54	-0,45	-1,33	0,11	0,70	0,98
LE	0,24	-0,40	0,36	-0,19	0,82*	0,28	0,19	0,06	0,39	-0,52*	-0,17	0,23	0,24	-0,18	-0,48	0,25	0,34
BIO	21,1*	-6,02	-16,7*	-1,25	16,6*	-6,11	8,45	5,96	2,23	-1,40	-27,1*	21,2*	21,1*	-19,0*	-37**	7,50	9,10
PLL	6,68	-2,52	-2,35	-1,02	6,29	-3,04	2,60	3,56	0,74	-1,27	-13,0*	10,0	9,27	-13,0*	-18**	5,40	7,53
HI	1,29	-1,49	-2,52	0,66	0,81	0,84	1,18	-1,47	1,02	0,03	0,14	-0,04	0,94	1,76	0,59	1,75	2,42
PNE	13,3*	-4,67	-4,15	-1,40	9,14	-2,60	4,68	2,87	1,96	-1,31	-13,3*	11,6*	10,7	-6,56	-17*	5,28	6,00
NGE	1,35	-2,82	7,8*	2,23	2,39	3,27	0,42	8,0*	-2,37	-9,14*	-3,95	2,00	8,37*	-1,87	-11*	2,72	4,52
NE	3,98	-0,08	-1,08	-0,48	2,17	-0,96	1,23	-0,51	0,46	-1,11	-4,54	3,88	2,62	-3,39	-5*	2,67	5,08
PMG	2,56	-1,52	-0,55	0,26	1,30	0,09	-0,35	0,85	0,18	2,57	-2,61	0,03	1,03	0,72	-1,74	1,50	2,52
RDT	9,27*	-3,20	-7,19	-0,38	7,12	-1,56	3,84	0,83	1,92	-0,81	-9,2**	7,83	7,64	-4,28	-11*	3,85	4,70

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la palle/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

1 : Waha, 2 : Zb/Fg, 3 : Mexicali<sub>75</sub>, 4 : Ofanto, 5 : Gta dur, 6 : Guemgoum rkhem.

Par contre, pour le nombre de grains par épi, les hybrides Waha/Ofanto, Zb/Fg/(gaviota/durum), Mexicali/Ofanto, et Ofanto/(gaviota/durum) présentent des effets d'ASC significatifs de valeurs respectives 7.8, 8.0, -9.14 et 8.37 grains (Tableau 3.7). Pour le contenu en proline et la teneur relative en eau de la feuille étendard, seul les hybrides Waha/Guemgoum Rkhem et Waha/Ofanto présentent des effets d'ASC significatifs (Tableau 3.7). L'hybride Waha/Mexicali<sub>75</sub> présente un effet d'ASC significatif d'une valeur de 2.36 j pour la durée de la phase levée-épiaison. Paradoxalement, malgré que ces deux géniteurs soient précoces au stade épiaison, ils engendrent une descendance relativement plus tardive de 2.36 jours (Tableau 3.7). Le rendement grain de l'hybride est positivement et significativement corrélé avec les effets d'ASC de la surface de la feuille étendard, la hauteur de la végétation et de la longueur du col de l'épi, de la biomasse aérienne et de la paille produite, du poids des épis, du rendement et des composantes du rendement (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Coefficients de corrélation du rendement de l'hybride avec les effets d'ASC des variables mesurées.

Effet ASC/Traits	RDT <sub>hybride</sub>
<i>Pro</i>	-0.007
<i>TRE</i>	0.446
<i>Chls</i>	0.493
<i>Chlc</i>	-0.025
<i>PREC</i>	-0.417
<i>SF</i>	0.852
<i>PS</i>	0.464
<i>HT</i>	0.711
<i>Col</i>	0.551
<i>Ext</i>	0.287
<i>LE</i>	0.483
<i>BIO</i>	0.947
<i>PLL</i>	0.889
<i>HI</i>	0.291
<i>PNE</i>	0.925
<i>NE</i>	0.870
<i>NGE</i>	0.523
<i>PMG</i>	0.654
<i>RDT</i>	0.943
<i>r<sub>seuil5%</sub></i>	0.514

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la paille/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

Ces résultats indiquent qu'un rendement élevé de l'hybride est engendré par des effets d'ASC positifs et significatifs pour les caractères ci-dessus cités.

### 3.3. Coefficients de variation phénotypique et génotypique, composantes de la variance et l'héritabilité

Les estimations des composantes de la variance, l'héritabilité aux sens large et étroit et les coefficients de variation génétique et phénotypique des caractères mesurés sont indiquées au tableau 3.9. Le coefficient de variation phénotypique varie de 2.67% pour la précocité au stade épiaison à 37.44% pour la paille produite (Tableau 3.9). Hormis les caractères teneur relative en eau et la précocité au stade épiaison, dont les CVp sont relativement faibles, les autres caractères montrent une variabilité élevée (Tableau 3.9).

Ces résultats sont confirmés par ceux pris par le coefficient de variation génotypique dont les valeurs varient de 1.97% pour la teneur relative en eau à 31.17% pour la paille produite (Tableau 3.9). Ces résultats corroborent en partie ceux rapportés par IQBAL et KHAN [125] ainsi que par HASSAN *et al.* [120].

La composante de dominance de la variance est nulle pour le poids spécifique foliaire, l'indice de récolte et le poids de 1000 grains, suggérant que ces caractères sont entièrement sous contrôle génétique de nature additive. Par contre la composante additive de la variance du poids des épis est nulle, indiquant que ce caractère est entièrement sous contrôle génétique de nature non additive (Tableau 3.9).

La composante additive de la variance est largement supérieure à la composante de dominance pour le contenu en proline, la teneur relative en eau, le contenu en chlorophylle la précocité au stade épiaison, la surface de la feuille étendard, la hauteur de la végétation, la longueur de l'extrusion et de l'épi et le nombre de grains par épi (Tableau 3.9). La composante de dominance est largement supérieure à la composante additive pour la biomasse aérienne, le nombre d'épis, le poids des épis et le rendement grain. Ces deux composantes ont des valeurs assez proches l'une de l'autre pour la longueur du col et la paille produite (Tableau 3.9). Ces résultats indiquent que les premiers caractères cités sont sous contrôle génétique de nature plutôt additive, les seconds le sont sous

contrôle de nature non additive et les autres sont sous contrôle génétique de natures additive et non additive.

Tableau 3.9 : Coefficients de variation phénotypique et génotypique, composantes de la variance et degré de l'héritabilité aux sens large et étroit des caractères mesurés.

Traits	CV <sub>P</sub> (%)	CV <sub>G</sub> (%)	$\sigma^2_P$	$\sigma^2_G$	$\sigma^2_A$	$\sigma^2_D$	h <sup>2</sup> <sub>bs</sub>	h <sup>2</sup> <sub>ns</sub>
Pro	22,11	13,52	6,36	2,38	1,87	0,51	0,37	0,29
TRE	4,68	1,97	19,12	3,38	2,27	1,11	0,18	0,12
Chls	8,90	8,39	21,88	19,43	15,36	4,06	0,89	0,70
Chlc	22,65	20,96	74,75	63,99	53,00	11,00	0,86	0,71
Prec	2,47	2,34	11,66	10,42	10,12	0,30	0,89	0,87
SF	12,92	11,24	21,44	16,21	16,21	5,51	0,76	0,50
PS	15,97	5,93	1,58	0,22	0,22	0,00	0,14	0,14
HT	15,62	14,69	126,68	112,12	103,17	8,96	0,89	0,81
COL	10,87	9,26	9,71	7,04	3,62	3,42	0,73	0,37
Ext	9,55	8,84	4,42	3,79	3,31	0,48	0,86	0,75
LE	8,64	8,03	0,57	0,49	0,39	0,10	0,86	0,69
BIO	29,37	20,33	385,93	184,84	20,68	164,16	0,48	0,05
PLL	37,44	31,17	123,13	85,32	44,21	41,11	0,54	0,54
HI	14,53	13,43	26,62	24,25	24,25	0,00	0,85	0,91
PNE	26,13	14,58	97,94	30,52	0,00	30,52	0,31	0,00
NE	22,68	13,09	10,29	3,43	0,34	3,08	0,33	0,03
NGE	18,40	15,99	115,66	87,31	71,54	15,77	0,75	0,62
PMG	9,38	6,24	14,86	6,58	6,58	0,00	0,44	0,44
RDT	30,13	19,38	51,10	21,14	0,79	20,35	0,41	0,02

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la palle/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

BHATERIA *et al.* [126] mentionnent que le degré de l'héritabilité dont les valeurs sont supérieures à 0.5 est classé comme élevé ; il est moyen pour des valeurs situées entre 0.30 et 0.50 et il est faible pour des valeurs inférieures à 0.30. L'héritabilité au sens large représente la part relative de la variance génotypique dans la variation phénotypique, alors que l'héritabilité au sens étroit représente la part relative de la variance additive dans la variance phénotype totale [82].

Les valeurs prises par l'héritabilité au sens large sont faibles pour la teneur relative en eau et le poids spécifique foliaire. Elles sont moyennes pour le contenu en proline, la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis, le poids des

épis, le poids de 1000 grains et le rendement grain (Tableau 3.9). Elles sont élevées pour le contenu en chlorophylle, la précocité au stade épiaison, la surface de la feuille étendard, la hauteur de la végétation, la longueur du col de l'épi, de l'épi et de l'extrusion et l'indice de récolte (Tableau 3.9).

L'héritabilité au sens étroit est plus fiable et elle est importante pour les programmes de sélection, parce que la variabilité génétique additive est transmise à la descendance. Les estimations de l'héritabilité donnent une indication de la réponse attendue de la sélection dans les populations en ségrégation [82]. Les valeurs prise par l'héritabilité au sens étroit sont faibles pour la teneur relative en eau, le poids spécifique foliaire, la biomasse aérienne, le poids et le nombre d'épis par plante, et le rendement grain (Tableau 3.9). Elles sont moyennes à élevées pour le reste des caractères dont notamment la précocité au stade épiaison, le contenu en chlorophylle, la hauteur de la végétation, l'indice de récolte, et le nombre de grains par épi (Tableau 3.9). Ces résultats corroborent ceux rapportés par ABINASA *et al.* [127].

### 3.4. Etude de l'hétérosis

#### 3.4.1. Hétérosis par rapport au parent moyen

L'hétérosis exprimée relativement au parent moyen est très variable d'un hybride à l'autre et d'un caractère à l'autre (Tableau 3.10). Ainsi, pour le contenu en proline, l'hétérosis varie de -36.16% pour l'hybride Mexicali<sub>75</sub>/Ofanto à 74.02% pour Waha/Guemgoum Rkhem (Tableau 3.10). Pour le teneur relative en eau seul l'hybride Waha/Ofanto présente une hétérosis négative et significative d'une valeur de -18.83%. L'hétérosis de la chlorophylle varie de -24.49 à 20.0% et celle de la précocité au stade épiaison de -1.52 à 3.33%. Les hybrides Waha//Zb/Fg et Waha/Guemgoum Rkhem présentent des hétérosis positives et significatives pour plusieurs caractères à la fois, dont le rendement grain, le poids des épis et la hauteur de la végétation (Tableau 3.10).

Par contre, les hybrides Mexicali<sub>75</sub>/(Gaviota/durum) et (Gaviota/durum)//Guemgoum Rkhem présentent des hétérosis significatives et de signes négatifs pour plusieurs caractères dont le rendement grain, la biomasse aérienne, le rendement en paille, le poids des épis, le nombre d'épis et le rendement grain (Tableau 3.10). Pour les caractères dont le déterminisme

généétique est de nature additive et pour lesquels le degré de l'héritabilité au sens large ou au sens étroit est élevé, la performance de l'hybride peut être prédite, dans une certaine mesure, sur la base des performances du parent moyen. Tel est le cas de la précocité au stade épiaison (Figure 3.9). Par contre, pour les caractères dont le contrôle génétique est de nature non additive la relation entre la performance de l'hybride et celle du parent moyen n'est pas toujours optimale. Tel est le cas du rendement grain (Figure 3.10).

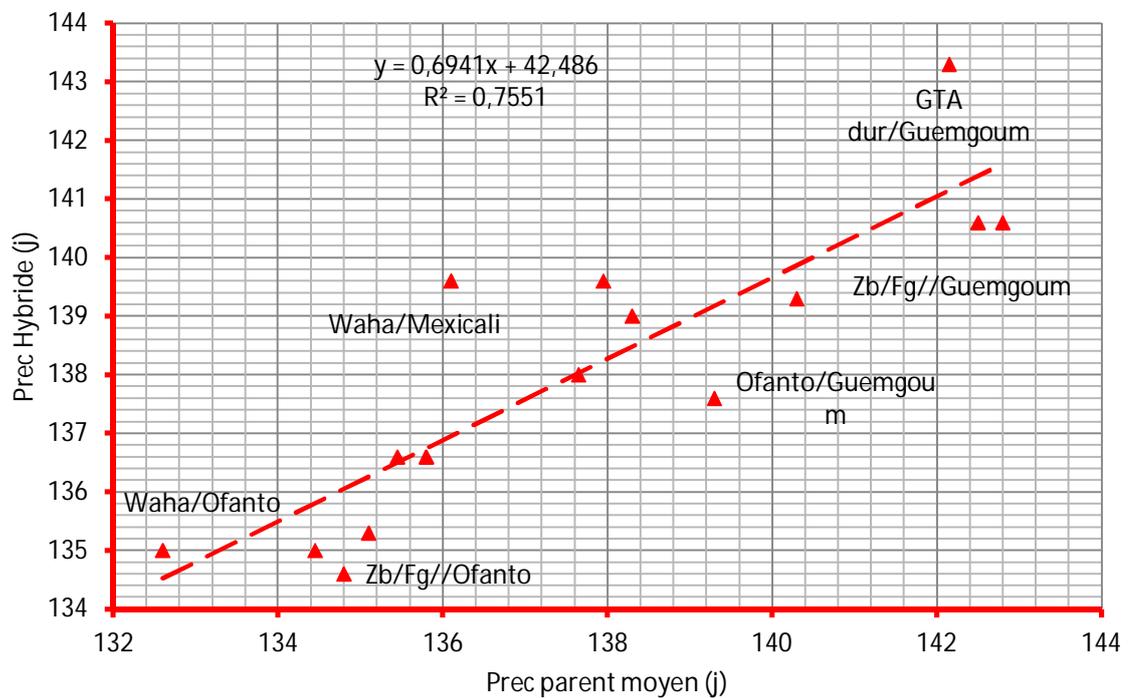


Figure 3.9 : Relation entre la précocité au stade épiaison de l'hybride et celle du parent moyen.

Tableau 3.10 : Hétérosis (%) par rapport au parent moyen des différents hybrides pour les variables analysées.

	1x2	1x3	1x4	1x5	1x6	2x3	2x4	2x5	2x6	3x4	3x5	3x6	4x5	4x6	5x6
Pro	-14,93	26,59*	0,97	13,20	74,02**	-21,43*	-33,44**	-19,69	7,10	-36,16**	-25,31*	10,37	-5,74	-5,19	3,17
TRE	-1,82	-2,39	-18,83**	-5,04	0,69	-0,38	0,45	-0,64	0,14	-2,74	-0,84	-1,08	-0,64	-5,28	-0,77
Chls	6,23**	-2,36	-0,25	0,61	-6,21**	-5,09*	-9,77**	-4,21*	-13,30**	3,81*	-8,67**	-10,96**	1,18	-7,21**	-16,07**
Chlc	4,38	11,58	4,48	3,96	-22,22**	-7,51	-24,49**	-17,00**	-25,74**	12,41*	1,58	-16,48*	20,00**	-17,66**	-12,70*
Prec	0,61	2,57**	1,76*	0,86	-0,71	0,48	3,09**	0,24	-1,29*	0,12	3,33**	-1,52*	0,37	-1,20*	0,82
SF	19,74**	-5,50	-2,70	-1,32	-4,79	3,12	7,16	-0,60	0,01	-4,15	-6,21	-3,84	5,06	-12,95**	-29,22**
PS	13,81	-4,33	-18,89	-11,37	-4,72	11,78	27,84*	18,96*	-13,78	-30,20**	-2,45	-22,92**	21,50*	-15,68	-8,87
HT	10,93*	-7,00*	0,89	-6,18	12,39**	0,88	3,11	5,04	3,03	-4,77	-13,48**	4,97	-2,10	3,37	-11,99**
COL	7,65	-8,34*	-1,85	-7,46*	19,03**	5,40	5,75	3,23	24,09**	4,73	-12,23**	10,63**	-4,02	10,27**	-10,13**
Ext	10,61**	-6,85**	7,05*	-4,51	-0,28	7,43**	15,85**	2,09	-3,27	5,61*	3,15	-5,25*	-3,43	-7,39**	-3,58
LE	9,40**	-4,41	7,37	-1,35*	13,96*	2,41	10,17	2,18	9,80	-7,68	2,86	2,62	1,47	0,37	-4,31
BIO	59,45**	-13,70	-29,66	-10,97	24,09	-11,15	2,80	4,41	7,17	-13,42	-38,27**	13,95	12,63	-34,06*	-56,08**
PLL	48,04*	-12,22	-9,81	-13,66	11,62	-14,59	3,36	4,17	-1,89	-17,75	-36,75*	8,86	11,43	-48,10**	-57,77**
HI	4,44	-6,61	-6,08	-0,10	5,08	1,76	-3,76	-3,19	10,14*	-0,97	-11,77**	0,84	2,26	10,28*	4,26
PNE	67,66**	-14,73	-0,75	-9,19	39,16*	-8,48	2,40	4,58	18,50	-10,40	-39,33**	19,86	13,43	-17,95	-54,27**
NE	44,74**	0,74	-3,11	-9,69	21,76	-7,03	0,06	-9,71	6,79	-17,96	-35,10**	17,10	-0,20	-32,84*	-46,63**
NGE	11,80	-6,41	20,52**	7,74	4,85	-0,05	8,88	16,49**	-6,31	-17,51**	-11,64	-8,63**	14,62**	-6,48	-26,33**
PMG	10,31*	-2,83	2,12	1,75	4,51	1,18	-3,04	3,82	2,34	8,40	-8,53	0,26	4,39	3,68	-3,99
RDT	72,10**	-19,11	-28,50	-9,76	50,52*	-8,73	0,26	1,56	28,94	-13,78	-44,72**	24,08	12,51	-19,78	-53,78**

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la paille/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

1 : Waha, 2 : Zb/Fg, 3 : Mexical<sub>75</sub>, 4 : Ofanto, 5 : Gta dur, 6 : Guemgoum rkhem.

Dans la mesure où le sens de la sélection est vers l'augmentation de la plus part des caractères, l'hybride le plus intéressant, dans ce contexte, est celui représenté par le croisement Waha//Zb/Fg. Cet hybride présente une hétérosis positive et significative pour plusieurs caractères d'intérêts agronomiques (Tableau 3.10).

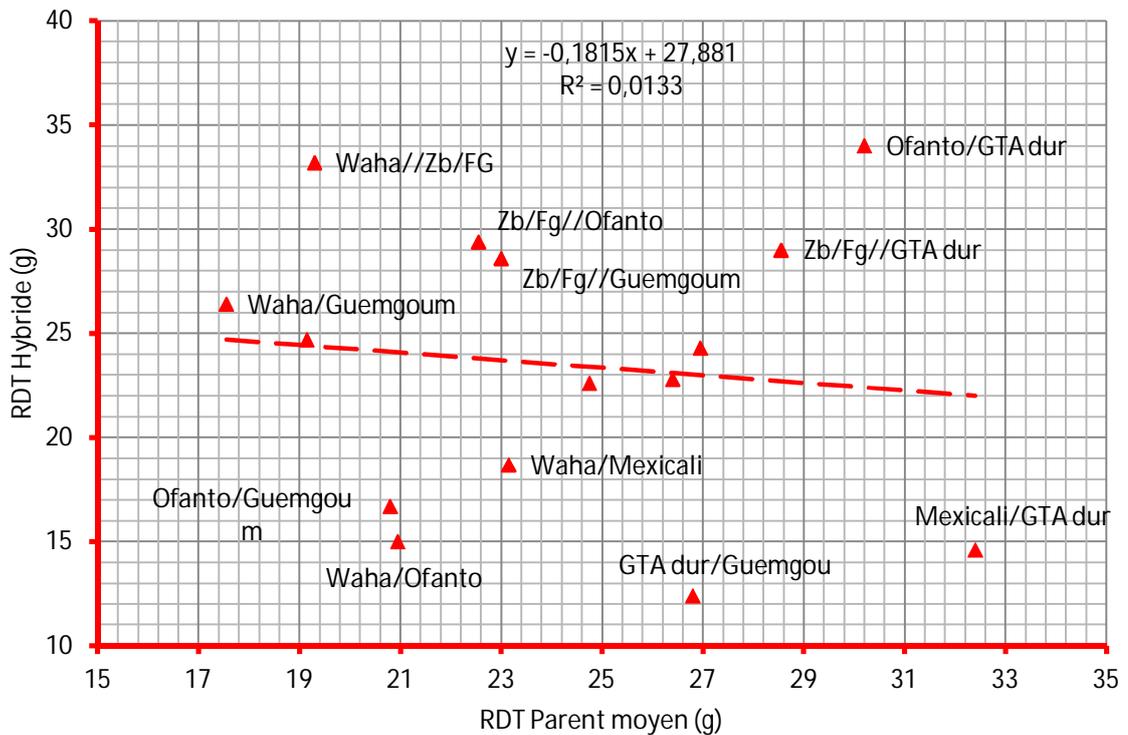


Figure 3.10 : Relation entre le rendement de l'hybride et celui du parent moyen.

#### 3.4.2. Hétérosis par rapport au meilleur parent

Les valeurs prises par l'hétérosis relativement au meilleur parent sont variables comme celles calculées relativement au parent moyen, selon les hybrides et les caractères considérés (Tableau 3.11). La plupart des valeurs de l'hétérosis par rapport au meilleur parent sont de signes négatifs, suggérant l'existence de peu de superdominance. Ainsi, l'hybride (gaviota/durum)/Guemgoum Rkhem présente des hétérosis dont les valeurs varient de -2.49% pour la précocité au stade épiaison à -65.79% pour le rendement grains (Tableau 3.11). Certains hybrides présentent cependant une hétérosis positive et significative pour plusieurs caractères tel est le cas du croisement Waha//Zb/Fg qui présente une hétérosis positive pour le contenu en chlorophylle (6.02%), pour la longueur de l'extrusion (8.47%), la longueur de l'épi

(6.30%), la biomasse aérienne (37.12%), le poids des épis (51.38%), le nombre d'épis (30.52%) et le rendement grain (59.03%) (Tableau 3.11).

L'hybride Waha/Guemgoum Rkhem présente une hétérosis positive égale à 36.10% pour le contenu en proline et à 11.83% pour la longueur du col de l'épi (Tableau 3.11). Par contre l'hybride Zb/Fg//Ofanto présente une hétérosis positive pour le poids spécifique foliaire (23.56%) et la longueur de l'extrusion (9.11%) (Tableau 3.11). Ces résultats rejoignent partiellement ceux obtenus par IQBAL *et al.* [128], KHAN et KHAN [129], RASUL *et al.* [130] et OGUZ *et al.* [131].

Tableau 3.11 : Hétérosis (%) par rapport au meilleur parent des différents hybrides pour les variables analysées.

	1x2	1x3	1x4	1x5	1x6	2x3	2x4	2x5	2x6	3x4	3x5	3x6	4x5	4x6	5x6
Pro	-21,64*	21,52	-10,68	3,27	36,10**	-30,28**	-36,33**	-31,96**	-21,01*	-45,50**	-9,87	-10,97	-22,97*	-32,03**	-13,12
TRE	-2,98	-3,72	-19,28**	-5,88	0,31	-0,57	-0,19	-0,92	-0,67	-3,54	-1,65	-2,07	-0,98	-5,45	-1,29
Chls	6,02*	-4,34*	-6,68**	-1,15	-10,17**	-7,20**	-15,74**	-6,07**	-16,79**	-8,23**	-4,04	-16,37**	-3,74	-16,60**	-20,95**
Chlc	-1,87	4,94	-8,61	-6,13	-31,49**	-17,90**	-30,10**	-29,06**	-37,98**	-6,70	27,73**	-22,13**	-3,76	-35,33**	-15,10*
Prec	-0,97	0,72	1,00	-0,49	-5,22**	0,24	0,72	0,00	-4,31**	-2,40**	0,72	-4,31**	-1,70**	-6,35**	-2,49**
SF	5,49	-23,57	-19,11**	-20,11**	-23,66**	-6,65	0,18	-9,91*	-10,37*	-7,41	-9,41*	-4,92	1,61	-16,82**	-30,10**
PS	5,71	-22,21	-26,99*	-23,32*	-22,54*	-3,31	23,56*	10,14	-25,43**	-37,79**	-13,05	-22,94*	16,21	-24,86*	-15,40
HT	5,62	-10,06*	-0,47	-11,17**	-6,99*	-6,96	-3,09	-5,05	-17,97**	-6,67	-18,88**	-10,71**	-6,10	-13,52**	-23,74**
COL	0,12	-9,46*	-2,76	-13,74**	11,83**	-3,07	-2,49	-10,02*	8,96*	4,42	-22,48**	5,16	-9,75*	4,52	-10,89**
Ext	8,47**	-10,00**	2,72	-10,98**	-14,00**	5,81*	9,11**	-3,06	-15,17**	-1,95	-11,20**	-15,79**	-13,35**	-22,85**	-11,36**
LE	6,30*	-12,95*	4,08	-11,15	1,71	-9,11	3,88	-10,28	-4,44*	-13,45*	-5,92	0,34	-5,95	-7,85	-5,29
BIO	37,12*	-31,76*	-37,73*	-33,98*	-6,56	-19,69	-0,56	-12,77	-8,75	-24,03	-55,00**	6,56	-8,37	-45,37**	-57,07**
PLL	19,42	-33,45*	-20,68	-37,35**	-27,21*	-21,36	-6,55	-9,59	-26,61**	-30,90*	-53,54**	-13,48	-11,15	-63,64**	-64,65**
HI	-3,50	-10,14*	-7,27*	-1,88	-21,61**	-2,45	-12,12**	-9,03*	-12,97**	-5,88	-10,77**	-22,74**	-0,82	-18,42**	-21,27**
PNE	51,38**	-30,49*	-11,79	-31,67**	28,89	-18,45	0,61	-14,95	15,25	-18,89	-56,01**	4,24	-6,46	-21,56	-63,59**
NE	30,52*	-8,48	-5,38	-27,48**	15,76	-7,79	-7,79	-20,81*	0,99	-23,82*	-55,30**	11,61	-18,38*	-34,66*	-55,38**
NGE	9,83	-17,57**	13,77	-3,81	-9,47	-13,31*	1,08	2,38	-17,86	-23,38**	-17,93**	-29,02**	8,01	-23,06*	-42,14**
PMG	5,16	-7,17	-6,17	-1,25	-11,42*	0,95	-6,73	1,92	-9,60*	4,05	-4,54	-11,61*	-1,35	-5,15	-16,54**
RDT	59,03**	-34,54*	-38,08*	-32,82**	49,18*	-21,08	-6,60	-19,95	18,17	-20,46	-59,70**	-0,27	-6,17	-31,05	-65,79**

Pro : proline, TRE : teneur relative en eau, Chls : taux de chlorophylle mesuré par le SPAD, Chlc : l'indice de contenance en chlorophylle, PREC : précocité à l'épiaison, SF : surface foliaire, PS : poids spécifique, HT : hauteur de la plante, COL : longueur du col de l'épi, Ext : longueur de l'extrusion, LE : longueur de l'épi. BIO : biomasse/plant, PLL : poids de la paille/plant, HI : l'indice de récolte, PNE : poids des épis, NE : nombre des épis/plant, NGE : nombre de grains par épis, PMG : poids de 1000grains, RDT : rendement grains/plant.

1 : Waha, 2 : Zb/Fg, 3 : Mexical75, 4 : Ofanto, 5 : Gta dur, 6 : Guemgoum Rkhem.

## DISCUSSION GENERALE

L'amélioration variétale du blé dur est conduite en réalisant des croisements au hasard, puis la sélection est pratiquée à l'intérieure de la variabilité ainsi créée. Lorsque le milieu de sélection et de production est plus variable, il serait plus judicieux de choisir les parents à croiser sur la base de leurs aptitudes à la combinaison et d'identifier la nature des actions géniques mises en jeu dans le contrôle des caractères servant de critères de sélection ou qui peuvent influencer le principal critère de sélection, pour décider de la stratégie de sélection à appliquer à la descendance [104]. Le dispositif diallèle est le plus souvent utilisé pour atteindre de tels objectifs.

L'analyse des résultats d'un croisement demi- diallèle de six variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) indique la présence des effets d'AGC significatifs pour la majorité des caractères étudiés, à l'exception du poids des épis, du nombre d'épis et du rendement grain qui montrent plutôt des effets d'ASC significatifs. La teneur relative en eau foliaire, le contenu en chlorophylle, la surface de la feuille étendard, la longueur du col et de l'épi ainsi que la biomasse aérienne et la paille produite par plante présentent aussi bien des effets d'AGC que des effets d'ASC significatifs. Ces résultats indiquent que des actions géniques de nature additive et non additive sont impliquées dans la transmission de ces caractères.

Le cultivar Waha présente un effet d'aptitude générale à la combinaison significatif pour la proline, ce cultivar est donc conseillé comme géniteur dans les situations où l'on cherche à améliorer le contenu en proline de la descendance. L'absence de lignée parentale qui présente un effet d'AGC significatif et positif pour le contenu relatif en eau, suggère la difficulté d'améliorer cette caractéristique en utilisant le jeu de variétés croisées. Pour le contenu en chlorophylle, Ofanto présente un effet d'aptitude à la combinaison positif et significatif, il est judicieux d'utiliser ce parent comme donneur pour améliorer le contenu en chlorophylle. Waha et Ofanto présentent des effets d'AGC significatifs et de signe négatifs, pour la durée de la phase levée-épiaison. Le cultivar Guemgoum Rkhem, présente un

effet d'AGC significatif mais de signe positif. Selon le sens de la sélection, ces géniteurs sont indiqués pour améliorer la durée de la phase végétative.

Pour la surface de la feuille étendard, Waha combine bien pour cette caractéristique, il porte les gènes qui réduisent les dimensions de ce caractère. A l'inverse, Mexicali<sub>75</sub> est apte à augmenter sensiblement la surface de la feuille étendard. Waha, Zb/Fg, Mexicali et Ofanto présentent des effets d'AGC significatifs et de signes négatifs pour la hauteur, à l'inverse de Guemgoum Rkhem qui présente un effet d'AGC positif et significatif. Cette même variété présente des effets significatifs et positifs pour la longueur du col, de l'extrusion, de l'épi, de la biomasse, de la paille et du poids de 1000 grains.

Waha et Ofanto passent à leurs descendances la capacité de produire moins de paille et de biomasse aérienne et la capacité de faire une bonne répartition de la biomasse produite entre le grain et la paille. Guemgoum Rkhem apparaît comme un géniteur tout indiqué qui combine bien avec les autres géniteurs pour augmenter la biomasse aérienne et la paille produite. La descendance de ce géniteur sera reprise en croisement avec des géniteurs comme Waha et/ou Ofanto pour en améliorer l'indice de récolte. Pour le nombre d'épis et le rendement grain, aucun géniteur étudié ne présente un effet d'AGC significatif.

L'hybride Waha//Zb/Fg présente des effets d'ASC significatifs et positifs pour plusieurs caractères à la fois dont la teneur en chlorophylle, le poids spécifique de la feuille étendard, la longueur de l'extrusion, la biomasse aérienne, le poids des épis et le rendement grain. Des effets d'ASC significatifs et de signes négatifs sont notés pour plusieurs caractères dont le rendement grain chez les hybrides ayant Guemgoum Rkhem comme parent commun : Mexicali<sub>75</sub>/Guemgoum Rkhem et (gaviota/durum)/Guemgoum Rkhem. Les résultats indiquent aussi que le rendement grain de l'hybride est positivement et significativement corrélé avec les effets d'ASC de la surface de la feuille étendard, la hauteur de la végétation et de la longueur du col de l'épi, de la biomasse aérienne et de la paille produite, du poids des épis, du rendement et des composantes du rendement.

Les valeurs prises par l'héritabilité au sens étroit sont faibles pour la teneur relative en eau, le poids spécifique foliaire, la biomasse aérienne, le poids et le

nombre d'épis par plante, et le rendement grain. Elles sont moyennes à élevées pour le reste des caractères dont notamment la précocité au stade épiaison, le contenu en chlorophylle, la hauteur de la végétation, l'indice de récolte, et le nombre de grains par épi. L'hétérosis, exprimée relativement au parent moyen, est très variable d'un hybride à l'autre et d'un caractère à l'autre. Pour le contenu en proline, l'hétérosis est de 74.02% chez Waha/Guemgoum Rkhem.

Les hybrides Waha//Zb/Fg et Waha/Guemgoum Rkhem présentent des hétérosis positives et significatives pour plusieurs caractères à la fois, dont le rendement grain, le poids des épis et la hauteur de la végétation. La plupart des valeurs de l'hétérosis par rapport au meilleur parent sont de signes négatifs, suggérant l'existence de peu de superdominance. Cependant, l'hybride Waha//Zb/Fg présente une hétérosis positive et significative pour le contenu en chlorophylle, la longueur de l'extrusion, la longueur de l'épi, la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis et le rendement grain.

En termes de stratégie de sélection à conduire, les résultats de la présente étude suggèrent que la sélection pour les caractères à hérédité simple et qui sont contrôlés par des gènes à effet additif peut être effectuée sur les générations précoces telle que la F<sub>2</sub> et la F<sub>3</sub>, voir la F<sub>4</sub>. Pour les caractères à déterminisme génétique complexe et qui montrent des effets d'ASC significatifs, il serait plus judicieux de pratiquer la sélection pour de tels caractères, tel que le rendement grain, la biomasse et le nombre et le poids des épis sur les générations plus tardives comme la F<sub>5</sub> voire la F<sub>6</sub>, lorsque les effets de dominance seront fortement réduits. De manière générale, les résultats de la présente étude corroborent les résultats de plusieurs études dont celles de MATUSCHKE *et al.* [132], CHOWDHRY *et al.* [133], SUBHAN *et al.* [134], RASHID *et al.* [135], MALIK *et al.* [136], AWAN *et al.* [137].

## CONCLUSION

Les résultats de la présente étude ont montrés que les six génotypes de blé dur utilisés diffèrent significativement pour tous les caractères étudiés. La majorité des caractères comme la teneur en chlorophylle, la proline, la hauteur, la date d'épiaison, la surface foliaire, la longueur du col, la longueur de l'extrusion, la longueur de l'épi, le poids de la paille, NGE, le PMG et l'indice de récolte HI ont montrés une large variabilité parmi les six parents et leurs hybrides, ce qui suggère la possibilité de sélection des meilleurs combinaisons hybrides pour ces caractères. L'analyse des aptitudes à la combinaison a révélé la présence de l'action des gènes additive et non-additive impliquée dans l'expression de l'ensemble des caractères étudiés. Toutefois, la majorité des traits sont contrôlés par des effets additifs avec des valeurs élevées de l'héritabilité au sens étroit. Cette observation suggère que la sélection pour ces caractères pourra être efficace et efficiente durant les générations précoces. L'étude de l'hétérosis a montré également que le croisement Waha//Zb/Fg exprime la meilleure performance pour le rendement grain et la plupart des caractères relatifs. Ceci prouve la possibilité de développer des génotypes de blé à travers l'amélioration génétique. En effet, on note que la variété (gaviota/durum) constitue un bon géniteur pour le rendement en grain. Les méthodes conventionnelles de sélection ont accompli un remarquable succès dans le développement des variétés à haut rendement. Cependant, l'utilisation d'autres approches non-conventionnelles peut accélérer le progrès de tels programmes de sélection. La sélection pour les caractères de nature polygéniques comme le rendement grains est beaucoup plus difficile. Les outils et techniques modernes de la biotechnologie et le génie génétique sont actuellement intégrés avec les systèmes conventionnels d'amélioration génétiques des plantes afin de faciliter le processus de sélection.

## REFERENCES

1. Hervieu, B., R.Capone, S. Abis., "The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean", Ciheam analytical note, N°9, (2006), 14pp.
2. Lahmar, R. et Ruellan, A., "Dégradation des sols et stratégies coopérative en Méditerranée : La pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable", Cahiers Agricultures, 16, (2007), pp. 318-323.
3. Ducellier, L., "Espèces et variétés de céréales cultivées en Algérie", Direction de l'agriculture et de la colonisation, (1930), 130 pages.
4. Benniou, R., "Les systèmes de production dans les milieux semi-arides en Algérie : Analyse agronomique de leur diversité et des systèmes de culture céréaliers dans les hautes plaines Sétifiennes", Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, (2007), INA, Alger.
5. MADR, "Annuaire statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural", Série B, (2011).
6. Hakimi, M. (1993). "L'évolution de la culture d'orge: Le Calendrier Climatique Traditionnel et les Données Agro-météorologiques Modernes", In: The Agro meteorology of Rainfed Barley-based Farming Systems. Proc. Symp. WMO ICARDA. Tunis March 1989, pp 157-166.
7. Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Oulmi, A., Bouzerzour, H., "Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14(1), (2010), 177-186.
8. Chehat F., "Nécessité impérieuse de construire la sécurité alimentaire de l'Algérie", Communication au forum Algeria-Invest, publié par [WWW.inraa.dz](http://WWW.inraa.dz) (aout 2011).

9. Griffing, B., "Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system", *Aust. J. Biol. Sci.* 9, (1956), 463-493.
10. Feldman, M. and Sears, E.R., "The wild gene resources of wheat", *Sci. Am.*, 244, (1981), 98-108.
11. Dvorak, J., M.C. Luo, Z.L. Yang and Zhang, H.B., "The structure of the *Aegilops tauschii* gene pool and the evolution of hexaploid wheat", *Theor. Appl. Genet.*, 97, (1998), 657–70.
12. Sakamura, T., "Kurze Mitteilung über die chromosomenzahlen und die Verwandtschaftsverhältnisse der *Triticum*-Arten", *In: Curtis, B.C., Rajaram, S. and Machpherson, G.H., "Bread wheat Improvement and Production", Eds. Food and Agriculture Organization, Rome, V. 30, (2002).*
13. Harlan, J.R., "Our vanishing genetic resources". *Science* 188, (1975), 618–621.
14. Ahn, S., Anderson, J.A., Sorrells, M.E. and Tanksley, S.D., "Homoeologous relationships of rice, wheat and maize chromosomes". *Molec. Gen. Genet.* V. 241, (1993), 483–490.
15. Spagnoletti-zeuli, P. L., Pace, C. and Porceddu, E., "Variation in durum wheat populations from three geographical origins. I. Material and spike characteristics", *Euphytica* Vol. 33 (2), (1984), 563-575.
16. Jahier, J., Chalhoub, B. et Charcosset, A., "La domestication des plantes : de la cueillette à la post-génomique", *Biofutur*, N° 266, (2006), 28-33.
17. Pena, R.J., W.H. Pfeiffer., 2005. "Breeding methodologies and strategies for durum wheat quality improvement". *In: Conxita, R., Nachit, M., di Fonzo, N., Araus, J.L., Pfeiffer, W.H., & Slafer, G.A. (eds.). Durum wheat breeding: current approaches and future strategies. Food product press. 663-686.*

18. ICE, "Durum Wheat futures and options", IntercontinentalExchange (2012), [www.theice.com/.../ICE\\_Durum\\_Wheat\\_white\\_paper.pdf](http://www.theice.com/.../ICE_Durum_Wheat_white_paper.pdf)
19. FAO, "Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture", Rapport annuel, (2011).
20. Bedrani, S., "L'alimentation de rue en Algérie : quelques réflexions sur la base d'une enquête visuelle rapide". Alger: Food and Agriculture Organisation (FAO), (2004).
21. Troccoli, A., Borrelli, G.M., De Vita, P., Fares, C., Di Fonzo, N., "Durum wheat quality: a multidisciplinary concept (mini review)", J. Cereal Sci. 32, (2000), 99–113.
22. Abbas, K. et Abdelguerfi, A., "Perspectives d'avenir de la jachère pâturée dans les zones céréalières semi-arides", Fourrages 184, (2005), 533-546.
23. Branlard, G., Pujos, E., Nadaud, I., Bancel, E et Piquet, A., "Nouveaux outils pour une analyse fine de la composition des grains", Innovations Agronomiques 19, (2012), 37-49.
24. Johansen, C., B. Baldev, J.B. Brouwer, W. Erskine, W.A. Jermyn, L.J. Lang, B.A. Malik, A.A. Miah, and S.N. Silim., "Biotic and abiotic stresses constraining productivity of cool season food legumes in Asia, Africa and Oceania".- Current plant science and biotechnology in agriculture. V. 19, (1994), 175-194.
25. Levitt, J., "Responses of Plants to Environmental Stresses. Vol. II. Water, Radiation, and other Stresses". Academic Press, NY, (1980). 607 PP.
26. El Hafid, R., Smith, D.H., Karrow, M. and Samir, K., "Physiological attributes associated with early season drought resistance in spring durum wheat", Canadian Journal of Plant Science 78, (1998), 227-237.

27. Chennafi, H., Aïdaoui, A., Bouzerzour, H. and Saci, A., "Yield reponse of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivar Waha to deficit irrigation under semiarid growth conditions", *Asian J. Plant Sci.*, V. 05, (2006), 854 - 860.
28. Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A. and Hassous, K. L., "Selection of high yielding and risk efficient Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivars under semi-arid conditions", *Pak. J. Agro.*, 4, (2005), 360-365.
29. Bouzerzour, H., Benmahammed, A. "Environmental factors limiting barley grain yield in the high plateaus of eastern Algeria", *Rachis*, 12, (1994), 11-14.
30. Passioura, J., "Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management". In proceedings of the 4th International Crop Science Congress "New directions for a diverse planet", Brisbane, Australia. (2004), 12 pages
31. Reynolds, M.P., Pellegrineschi, A. and Skovmand, B., "Sink-limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat". *Ann. Appl. Biol.* 146, (2005), 39–49.
32. Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Bemahammed, A., Hadj Sahraoui, A. et Harkati, N., "Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride", *Sécheresse*, V. 17, (2006), 507 - 513.
33. Fukai, S., and Cooper, M., "Development of drought-resistant cultivars using physio-morphological traits in rice". *Field Crops Res.* 40, (1995), 67-86.
34. Ludlow, M.M., and Muchow, R.C., "Critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments". *Adv. Agron.* 43, (1990), 107-153.

35. Fischer, R.A., and Maurer, R., "Drought resistance in spring wheat cultivars: 1. Grain yield response". *Aust. J. Agric. Res.* 29, (1978), 897-912.
36. Blum, A., "Breeding for Stress Environments", CRC Press, Boca Raton., (Eds.), (1988), 223 p.
37. Clarke, L. M., Depauw R.M., and Townley-Smith T.F., "Evaluation of the methods for quantification of drought tolerance in wheat", *Crop Sci.* 32, (1992), 723-728.
38. Yates, F., and Cochran, W.G., "The analysis of a group of experiments". *J. Agric. Sci.* 28, (1938), 556-580.
39. Finlay, K.W. and Wilkenson, G.N., "The analysis of adaption in a plant breeding programme". *Aust. J. Agric. Res.* 14, (1963), 742-754.
40. Eberhart, S.A. and Russel, W.A., "Stability parameters for comparing varieties". *Crop Sci.* 6, (1966), 36-40.
41. Kadi, Z., Adjel, F. and Bouzerzour, H., "Analysis of the genotype x environment interaction of barley grain yield (*Hordeum vulgare* L.) under semi- arid conditions". *Advances in Environmental biology.* 4, (2010), 34-40.
42. Meziani, N., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Menad, A. and Benbelkacem, A., "Performance and Adaptation of Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to Diverse Locations", *Advances in Environmental Biology*, 5(7), (2011), 1465-1472.
43. Lin, C.S. and Binns, M.R., "A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data". *Canadian Journal of Plant Sciences* 68, (1988), 193-198.
44. Fellah, A., Benmahammed, A., Djekoun, A., and Bouzerzour, H. "Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*)", *Actes de l'IAV, Hassan II (Maroc)* 22, (2002), 161-170.

45. Clarke, J.M., and Mc Caig, T.N., "Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat", *Crop Sci.* 22, (1982), 503-506.
46. Clarke, J.M., Romagosâ, I. and DePauw, R.M., "Screening durum wheat germplasm for dry growing conditions. Morphological and physiological criteria", *Crop Sci.* 3, 1, (1991), 770-775.
47. Sanchez-Rodriguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. Cervilla, L.M. Blasco, B. Rios, J.J. Rosales, M.A. Romero L. and Ruiz, J.M., "Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plants", *Plant Sci.*, 178, (2010), 30-40.
48. Dedio, W., "Water relations in wheat leaves as screening tests for drought resistance". *Can. J. Plant Sci.* 55, (1975), 369-378.
49. Zhang, N.I.N., Wilson, J.H.M. Cox, N.A. and Hall, S.A., "Measurement of heat injury in plant tissue by using electrical impedance analysis". *Cm. J. Bot.* 71, (1993), 1605- 1611.
50. QuartzicCI, M.F., and Navari-Izzo. F. "Water stress and free radical mediated changes in sunflower seedlings", *J. Plant Physiol.* 139, (1992), 621-625.
51. Watanabe, N., Evans, J.R. and Chow, W.S., "Changes in the photosynthetic properties of Australian wheat cultivars over the 1<sup>st</sup> Century", *Aust. J. Plant Physiol.* 21, (1994), 169-183.
52. Morgan, J.M., "Osmoregulation and water stress in higher plants", *Ann. Rev. Plant. Physiology*, V. 35, (1984), 299 - 319.
53. Santarnaria, J.M., Ludlow, M.M. and Fukai, S., "Contribution of osmotic adjustment to grain yield in *Sorghum bicolor* L. under water-limited

- conditions: 1. Water stress before anthesis". *Aust. J. Agric. Res.*, V. 41, (1990), 51-65.
54. Morgan, J.M., "A gene controlling differences in osmoregulation in wheat". *Aust. J. Plant Physiol.*, V. 18, (1991), 249-257.
  55. Moinuddin, A., Fischer, R.A., Sayre, K.D., Reynolds, M.P., "Osmotic adjustment in wheat in relation to grain yield under water deficit environments", *Agron. J.*, V. 97, (2005), 1062–1071.
  56. Joyce, P.A., Aspinall, D. and Paleg, L.G., "Photosynthesis and the accumulation of proline in response to water deficit", *Aust. J. Plant Physiol.*, V. 19, (1992), 249-261.
  57. Stewart, C.R., and Bogges, S.F., "Metabolism of [5-3-<sup>2</sup>H] proline by barley leaves and its use in measuring the effects of water stress on proline oxidation". *Plant Physiol.*, V. 61, (1978), 654-657.
  58. Hanson, A.D., Nelsen, C.E. Pedersen, A.R. and Everson, E.H., "Capacity for proline accumulation during water stress in barley and its implication for breeding for drought resistance", *Crop Sci.*, V. 19, (1979), 489.
  59. Kueh, J.S., Hill J.M., Smith, J.S. and Bright, S.W., "Proline biosynthesis in proline accumulating barley", *Phytochem.*, V. 23, (1984), 2207.
  60. Zhang, L. H., Ozias-Akins, P., Kochert, G. Kresovich, S., Dean, R. and Hanna, W., "Differentiation of bermudagrass (*Cynodon* spp.) genotypes by AFLP analyses", *Theor. Appl. Genet.*, V. 98, (1999), 895-902.
  61. Belkherchouche, H., Fellah, S., Bouzerzour, H., Benmahammed, A. et Chellal N., "Vigueur de la croissance, translocation et rendement grain du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi arides", *Courrier du savoir*, V. 9, (2009), 17-24.

62. Hay, R.K.M., and Kirby, E.J.M., "Convergence and synchrony: - a review of the coordination of development in wheat", *Aust. J. Agric. Res.*, V. 42, (1991), 661-700.
63. Langer, R.H.M., and Hanif, M., "A study of floret development in wheat (*Triticum aestivum*)", *Ann. Bot.*, V. 37, (1973), 743-751.
64. Acevedo, E., Craufurd, P.Q. Austin, R.B. and Perez-Marco, P., "Traits associated with high yield in barley in low-rainfall environments", *J. of Agric. Sci., Cambridge*, V. 116, (1991), 23-36.
65. Annicchiarico, P. and Lannucci, A., "Adaptation strategy, germplasm type and adaptive traits for field pea improvement in Italy based on variety responses across climatically contrasting environments", *Field Crops Res.*, V. 108, (2008), 133–142.
66. Ehdaie, B., Alloush, G.A. and Waines, J.G., "Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat", *Field Crops Research*, V. 106, (2008), 34–43.
67. Blum, A., Zhang, J. and Nguyen, H.T., "Consistent differences among wheat cultivars in osmotic adjustment and their relationship to plant production", *Field Crops Research*, V. 64, (1999), 287-291.
68. Bahlouli, F., Bouzerzour, H. et Benmahammed, A., "Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie", *biotechnologie, agronomie, société et environnement*, V. 12, n° 1, (2008), 31-39.
69. Subbarao, G.V., Johansen, C. Slinkard, A.E. Nageswara Rao, R.C. Saxena, N.P. and Chauhan, Y.S., "Strategies for improving drought resistance in grain legumes", *Critical Rev. Plant Sci.*, V. 14, (1995), 469-523.

70. Coventry, D.R., Reeves, T.G. Brooke, H.D. and Cam, D.K., "Influence of genotype, sowing date, and seeding rate on wheat development and yield", *Aust. J. of Expt. Agric.*, V. 33, (1993), 751-757.
71. Rajaram, S., Braun, H.I. and van Ginkel, M., "CIMMYT's approach to breed for drought tolerance", *Euphytica*, V. 92, (1996), 147- 153.
72. Ceccarelli, S., Grando, S., Impiglia, A., "Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments", *Euphytica*, V. 103, (1998), 307-318.
73. Annicchiarico, P., Bellah, F., Chiari, T., "Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study", *Crop Sci*, V. 45, (2005), 1741-1749.
74. Dekkers, J. C. M., and Hospital, F., "The use of molecular genetics in the improvement of agricultural populations", *Nat. Rev. Genet.*, V. 3, (2002), 22–32.
75. Santoni, S., Faivre-Rampant, P., Prado, E. et Prat, D., "Marqueurs moléculaires pour l'analyse des ressources génétiques et l'amélioration des plantes". *Cah. Agri.*, V. 9, n° 4, (2000), 3311-3327.
76. Graner, A., Jahoor, A., Schondelmaier, J., Siedler, H., Pillen, K., Fischbeck; G., Wenzel, G. and Herrmann, R., "Construction of an RFLP map of barley", *Theor. Appl. Genet.*, V. 83, (1991), 250-256.
77. Najimi, B., El Jaafari, S., Jlibène, M. et Jacquemin, J. M., "Applications des marqueurs moléculaires dans l'amélioration du blé tendre pour la résistance aux maladies et aux insectes". *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, V. 7, n°1, (2003), 17–35.

78. Williams, J.G.K., Kubelik, A.R., Livak, K.J., Rafalski, J.A. and Tingey, S.V., "DNA Polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers", *Nucleic Acids Research.*, V. 18, (1990), 6531 - 6535.
79. Olson, M., Hood, L., Cantor, C. and Botstein, D., "A common language for physical mapping of the human genome", *Science*, V. 245, (1989), 1434 - 1435.
80. Vos, P., Hogers, R., Bleeker, M., Reijans T., Van de Lee, T., Hornes, M., Frijters, A., Pot, J., Peleman, J., Kuiper, M. and Zabeau, M., "AFLP: A new technique for DNA fingerprinting", *Nucl. Acids Res.*, V. 23, (1995), 4407-4414.
81. Huang, X. Q., Hsam; S. L. K., Zeller, F. J., Wenzel, G., and Mohler, V., "Molecular mapping of the wheat powdery mildew resistance gene Pm24 and marker validation for molecular breeding", *Theor. Appl. Genet.*, V. 101, (2000), 407- 414.
82. Falconer, D.S. and Mackey, F.C., "Introduction to quantitative genetics", Fourth Edition. Longman. New York, (1996).
83. Kearsey, M. J. and Farquhar, A. G. L., "QTL analysis in plants; where are we now?", *Heredity*, V. 80, (1998), 137-142.
84. Tanksley, S. D., "Mapping Polygenes", *Annual Rev. Genetic*, V. 27, (1993), 205-233.
85. Sax, K., "The association of size differences with seed coat protein and pigmentation *Phaseolus vulgaris*", *Genetics*, V. 8, (1923), 552-560.
86. Thoday, JM., "Location of polygenes", *Nature (London)*, V. 191, (1961), 368-370.

87. Faris, J. D., Li, W. L., Liu, D. J., Chen, P. D. and Gill, B. S., "Candidate gene analysis of quantitative disease resistance in wheat", *Theor. Appl. Genet.*, V. 98, (1999), 219-225.
88. Pflieger, S., Lefebvre, V., Caranta, C., Blattes, A., Goffinet, B. and Palloix, A., "Disease resistance gene analogs as candidates for QTLs involved in pepper-pathogen interactions", *Genome*, V. 42, (1999), 1100-1110.
89. Pickett, A.A., "Hybrid wheat-Result and Problems". *Plant breeding Berlin: Paul Parey Sc Publish*, V. 15, (1993), 1-58.
90. Le Gouis, J., Beghin, D., Heumez, E. and Plauchard, P., "Diallel analysis of winter wheat at two nitrogen levels", *Crop Sci.* 42, (2002), 1129-1134.
91. Baker, R.J., "Issues in diallel analysis", *Crop Sci.*, V. 18, (1978), 533-536.
92. Singh, R.K. and Chaudhary, B.D., "Biometrical Methods in Quantitative Genetics Analysis", Kalyani Publishers, New Delhi, India, (1999), 318 p.
93. Sayed, H.I., "Combining ability for yield and its component characters in wheat", In: S. Ramanujam (ed.). *Proceeding of the Fifth International Wheat Genetic Symposium*, New Delhi, (1978), 634-636.
94. Allard, R.W., "Principles of plant breeding". John Wiley & Sons, Inc. New York, (1960), 485 p.
95. Hallauer, A.R., "Temperate maize and heterosis", in: *the genetics and exploitation of heterosis in crops*, Second edition. Iowa State University Press, Ames, Iowa. USA, (1999), 353-362.
96. Lynch, M. and Walsh, B., "Genetics and analysis of quantitative traits", Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts, (1998) USA.
97. Bouufnar-Zaghouane Fatiha et Zaghouane Omar., (2006). *Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie*. Première édition ITGC 2006.

98. Troll, W. and Lindsley, J., "A photometric method for the determination of proline", *J. Biol Chem*, V. 215, (1955), 655-660.
99. Monneveux, P. et Nemmar, M., "Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement", *Agronomie*, V. 6, (1986), 583-590.
100. Burton, G, W, and Devane, E. M., "Estimating heritability in tall Fescae (*Festuca arundinacea*) from replicated clonal material", *Agronomy Journal*, V. 43, (1953), 478-481.
101. Sivasubramanian, S. and Menon, M., "Heterosis and inbreeding depression in rice", *Madras Agricultural Journal*, V. 60, (1973), 11-39.
102. Robinson, H. F., Comstock, R. E. and Harvey, P. H., "Genotypic and phenotypic correlations in corn and their implications in selection", *Agronomy Journal*, V. 43, (1949), 282-287.
103. Wynne, J. C., Emery, D. A. and Rice, P. M., "Combining ability estimates in *Arachis hypogea* L. II. Field performance of F1 hybrids", *Crop Science.*, V. 10, n°6, (1970), 713-715.
104. Farshadfar, E., Rafiee, F. and Yghotipoor, A., "Comparison of the efficiency among half diallel methods in the genetic analysis of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions", *Annals of Biological Research*, V. 3, n°3, (2012), 1607-1622.
105. Yoshida, S., Bhattacharjee, D.P. and Cabuslay, G.S., "Relationship between plant type and root growth in rice", *Soil Science and Plant Nutrition*, V. 28, n°4, (1982), 473-482.

106. Ehdiaie, B., Alloush, G. A. Madore, M. A. and Waines, J. G., "Genotypic Variation for Stem Reserves and Mobilization in Wheat: I. Postanthesis Changes in Internode Dry Matter", *Crop Sci.* 46, (2006), 735–746.
107. Kirby, E.J.M., "Analysis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis", *Field Crops Res.* 18, (1988), 127–140.
108. Miralles, D.J., Katz, S.D., Colloca, A., Slafer, G.A., "Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height", *Field Crops Res.* 59, (1998), 21–30.
109. Bouzerzour, H., Djekoune, A., Benmhammed, A. et Hassous, L., "Contribution de la biomasse aérienne, de l'indice de récolte et de la précocité au rendement en grain de l'orge (*H. vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude", *Cah. Agric.*, 7, (1998), 307-317.
110. Chennafi, H., Hannachi, A., Touahria, O., Fellahi, Z., Makhoulouf, M., and Bouzerzour, H. "Tillage and Residue Management Effect on Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) Thell. ssp. *turgidum* conv. *durum* (Desf.) MacKey] Growth and Yield under Semi Arid Climate", *Advances in Environmental Biology*, 5(10), (2011), 3231-3240.
111. Saraoui, T., "Etude de la variabilité morphologique de populations F2 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Utilisation d'un indice de sélection", Mémoire de Magister, Département Agronomie, Fac. Sci. Univ. Hadj Lakhdar, Batna. (2011), 75 p.
112. Miller William, G. "Statistics and Measurement Concepts for LazStats. A User's Manual", (2012).
113. Laala, Z., Oulmi A., Saraoui, T., Haddad, L., Nouar, H., Benmahammed, A. et Bouzerzour, H. "Effet de la sélection de la biomasse et des épis sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf) sous conditions semi-arides",

Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur Vol. 1 N° 4, (2009), 55-68.

114. Quick, J.S., "Combining ability and interrelationship among an international array of durum wheat", In: S. Ramanujam (ed.). Proceedings of the Fifth International Wheat Genetic Symposium. New Delhi. (1978), pp. 634-647.
115. Sener, O., "Identification of breeding potential for grain yield and its component traits of common wheat varieties in the east Mediterranean", *Agrociencia* 43, (2009), 707-716.
116. Yücel, C., Baloch, F. S. and Özkan, H., "Genetic analysis of some physical properties of bread wheat grain (*Triticum aestivum* L. em Thell)", *Turk J Agric For* 33, (2009), 525-535.
117. Chowdhary, M. A., Sajad M. and Ashraf M.I., "Analysis on combining ability of metric traits in bread wheat, *Triticum aestivum*", *J. Agric. Res.*, 45(1), (2007).
118. Oettler, G. Burger, H., Melchinger, A. E., "Heterosis and combining ability for grain yield and other agronomic traits in winter triticale", *Plant Breeding* 122, (2003), 318-321.
119. Hanifi-Mekliche, L., Boukecha, D. et Mekliche, A. "Analyse agronomique et génétique de quelques variétés de blé dur et de leurs hybrides f1 en conditions pluviales", *Sciences & Technologie C – N°27*, juin (2008), pp.9-14.
120. Hassan, G., Fida, M., Afridi, S.S. and Iftikhar, K., "Combining ability in the f1 generations of diallel cross for yield and yield components in wheat", *Sarhad J. Agric.* Vol. 23, No. 4, (2007), 937-942.

121. Hassan, G., "Diallel analysis of some important parameters in wheat triticum aestivum under irrigated and rainfed conditions", MS, thesis, NWFP Agri. Univ., PESHAWAR, Pakistan, (2004), 171 p.
122. Zare-kohan, M. and Heidari, B., "Estimation of Genetic Parameters for Maturity and Grain Yield in Diallel Crosses of Five Wheat Cultivars Using Two Different Models", Journal of Agricultural Science; Vol. 4, No. 8, (2012).
123. Mather, K. and Jinks, J.L., "Biometrical Genetics". London, Chapman & Hall. (1971).
124. Chowdhary, M. A., Sajad M. and Ashraf M.I., "Analysis on combining ability of metric traits in bread wheat, (*Triticum aestivum*)", J. Agric. Res., 45, (1), (2007).
125. Iqbal, M. and Khan, A., "Estimation of Combining Ability Effects for Plant Biomass, Grain Yield and Protein Content in Wheat (*Triticum aestivum* L.)", International Journal of Agriculture & Biology. Vol. 8, No. 5, (2006).
126. Bhateria, S., Sood, S.P. and Panthania, A., "Genetic analysis of quantitative traits across environments in linseed (*Linum usitatissimum* L.)". Euphytica 150, (2006), 185-194.
127. Abinasa, M., Ayana, A. and Bultosa, G., "Genetic variability, heritability and trait associations in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes", African Journal of Agricultural Research Vol. 6(17), (2011), pp. 3972-3979.
128. Iqbal, M., Alam, K. and Chowdhry, M.A., "Exploitation of heterosis and heterobeltiosis for yield and its components in some intra-specific crosses of wheat". Pakistan J. Agric. Sci., 27, (1990), 73–79.

129. Khan, M.A. and Khan, A.S., "Heterosis studies for yield and yield components in some crosses of bread wheat", *Pakistan J. Agri. Sci.*, 33, (1996), 66–68.
130. Rasul, I., Khan, A. and Zulfikar, A., "Estimation of Heterosis for Yield and some Yield Components in Bread Wheat", *Int. J. Agri. Biol.*, Vol. 4, No. 2, (2002), 214-216.
131. Oguz, B., Kayihan, Z. Korkut, A. B. and Ismet B., "Assessment of heterosis and heterobeltiosis for spike characters in durum wheat", *Pakistan J. Agric. Res.* Vol 24 No. 1-4, (2011).
132. Matuschke, I., Mishra, R.R. and Qaim, M., "Adoption and impact of hybrid wheat in Indian", *World Dev.*, 35, (2007), 1422–1435.
133. Chowdhry, M.A., Parveen, N. Khaliq I. and Kashif, M., "Estimation of heterosis for yield and yield components in bread wheat". *J. Agric. Soc. Sci.*, 1, (2005), 304–308.
134. Subhan, M., Qasim, M. Ahmed, R.D. Khan, M.U., Khan M.A. and Ameen, M.A., "Combining ability for yield and its components in upland cotton", *Asian J. Plant Sci.*, 2, (2003), 519–522.
135. Rashid, M., Cheema A.A. and Ashraf, M., "Line X tester analysis in basmati rice", *Pakistan J. Bot.*, 39, (2007), 2035–2042.
136. Malik, S.I., Malik, H.N., Minhas, N.M. and Munir, M., "General and specific combining ability studies in maize diallel crosses". *Int. J.Agric. Biol.*, 6, (2004), 856–859.
137. Awan, S.I., Faisal, M., Malik, A. and Siddique, M., "Combining ability analysis in intervarietal crosses for component traits in hexaploid wheat", *J. Agric. Soc. Sci.*, 4, (2005), 316–317.

**APPENDICE A**  
**LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS**

$\sigma^2_{AGC}$ :	Variance de l'aptitude générale à la combinaison
$\sigma^2_{ASC}$ :	Variance de l'aptitude spécifique à la combinaison
°C :	degré Celsius
ADN :	Acide Désoxyribonucléique
AFLP :	Polymorphisme de Longueur des Fragments Amplifiés
AGC :	Aptitude Générale à la Combinaison
ASC :	Aptitude Spécifique à la Combinaison
BC:	Back cross
Bio :	Biomasse totale
CCI:	Chlorophyll Content Index
CCM:	Chlorophyll Content Meter
Chla :	Chlorophylle a
Chlb :	Chlorophylle b
Chlt :	Chlorophylle total
CIMMYT:	International Maize and Wheat Improvement Center
CM :	Carré Moyen
Col :	Longueur du col de l'épi
CV :	Coefficient de variation
CVG :	Coefficient de variation génétique
CVP :	Coefficient de variation phénotypique
Ddl :	Degré de liberté
DE :	Date d'épiaison
DO:	Densité optique
FAO :	Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

$h^2$ (sens étroit) :	Héritabilité au sens étroit
$h^2$ (sens large) :	Héritabilité au sens large
HBP :	Hétérosis par rapport au meilleur parent
HD:	Haploïde doublé
HI :	Indice de récolte
HMP :	Hétérosis par rapport au parent moyen
HT :	Hauteur de la tige
IAO:	Institut Agronomique pour l'Outre-mer
ITGC :	Institut Technique des Grandes Cultures
kg/hab/an :	Kilogramme par Habitant et par an
LE :	Longueur de l'épi
m :	mètre
MADR :	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
mg g <sup>-1</sup> :	Milligramme par gramme
NE :	Nombre d'épis
NGE :	Nombre de grain par épi
nm:	nano-mètre
Pb :	Paire de base
PCR :	polymerase Chain Reaction
PMG :	Poids de mille grains
PSF:	poids spécifique foliaire
q ha <sup>-1</sup> :	quintaux par hectare
QTL :	Quantitative Trait Loci
RAPD :	Amplification Aléatoire d'ADN polymorphe
RDT :	Rendement grains
RFLP :	polymorphisme de Longueur des Fragments de Restriction
SCE :	somme des carrés des écarts

SE :	erreur standard
SF:	Surface foliaire
SSR :	Simple Sequence Repeats
STS :	Sequence-Tagged Sites
TRE :	Teneur relative en Eau des feuilles
$\sigma^2g$ :	l'effet de l'aptitude générale à la combinaison
$\sigma^2s$ :	l'effet de l'aptitude spécifique à la combinaison.
$\sigma^2_A$ :	variance additive
$\sigma^2_D$ :	variance de dominance
$\sigma^2_e$ :	variance environnementale
$\sigma^2_G$ :	Variance génétique
$\sigma^2_p$ :	variance phénotypique

## APPENDICE B PUBLICATION 1



Electronic Journal of Plant Breeding, 4(1): 1027- 1033 (Mar 2013)

ISSN 0975-928X

### Research Article

## Diallel-cross analysis of grain yield and stress tolerance-related traits under semi-arid conditions in Durum wheat (*Triticum durum* Desf.)

HANNACHI Abderrahmane<sup>1</sup>, FELLAHI Zine El Abidine<sup>1</sup>, BOUZERZOUR Hamenna<sup>2</sup> and BOUTAKRABT Ammar<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>National Institute of Agricultural Research, (INRAA), Setif Agricultural Research Unit, 19000 (Algeria).

<sup>2</sup>Faculty of Life and Natural Sciences, Ecology and Plant Biology Department, University Ferhat Abbas Setif 1, 19000 (Algeria).

<sup>3</sup>Faculty of Agro-veterinary and Biological Sciences, Agronomy Department, University Saad Dahlab Blida, 09000 (Algeria).

Email: [abderhannachi@yahoo.fr](mailto:abderhannachi@yahoo.fr)

(Received: 22 Jan 2013; Accepted: 08 Feb 2013)

### Abstract

Half-diallel analysis with six genotypes of durum wheat was conducted for grain yield, yield components and agronomic traits related to abiotic stress tolerance. Aim of this study is to identify best parents for hybridization. Cultivar Guemgoum Rkhem proved to be best general combiner for number of days to heading, straw yield, plant height and thousand-kernel weight. Gaviota durum was best combiner for number of grains per spike, and cultivar Ofanto for Chlorophyll content and harvest index. Waha proved to be a poor general combiner for flag leaf area, straw yield, plant height and thousand-kernel weight. Mexicali<sub>75</sub>/Guemgoum Rkhem cross is best suited to improve earliness, straw yield, plant height, and grain yield. Narrow-sense heritability was low for grain yield. Waha//Zenati Bouteille/Flamingo and Waha/ Guemgoum hybrids showed significant mid-parent heterosis for grain yield.

### Keywords:

Durum wheat, diallel, combining ability, gene action, heterosis.

## APPENDICE B

### PUBLICATION 2

Journal of Agriculture and Sustainability  
ISSN 2201-4357  
Volume 3, Number 2, 2013, 122-131



#### **Correlation, Path Analysis and Stepwise Regression in Durum Wheat (*Triticum Durum* Desf.) under Rainfed Conditions**

**HANNACHI Abderrahmane<sup>1</sup>, FELLAHI Zine El Abidine<sup>1</sup>, BOUZERZOUR Hamenna<sup>2</sup> and BOUTEKRABT Ammar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>National Institute of Agricultural Research (INRAA), Setif Agricultural Research Unit, 19000 (Algeria)

<sup>2</sup>Faculty of Life and Natural Sciences, Ecology and Plant Biology Department, University Ferhat Abbas Setif 1, 19000 (Algeria)

<sup>3</sup>Faculty of Agro-veterinary and Biological Sciences, Agronomy Department, University Saad Dahlab Blida, 09000 (Algeria)

Corresponding author: HANNACHI Abderrahmane, National Institute of Agricultural Research (INRAA), Setif Agricultural Research Unit, 19000 (Algeria).

---

The present study was carried at the Field Crop Institute-Agricultural Experimental Station of Setif (Algeria) during 2011/12 crop season. Correlation, Path analysis and stepwise regression were executed to investigate the relationships between grain yield and other important yield components in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). The experimental material consisted of fifteen hybrids produced using a half diallel fashion in 2010/11 season and their six parents. Differences among all the traits were statistically significant. Grain yield per plant was significantly and positively correlated with above ground biomass, straw yield, number of spikes per plant and number of grains per spike. Results of stepwise regression and path analysis revealed that both above ground biomass and harvest index can be a criterion to select high-yielding genotypes in breeding durum wheat programs.

**Key words:** durum wheat, correlation, path analysis, stepwise regression, grain yield.

---