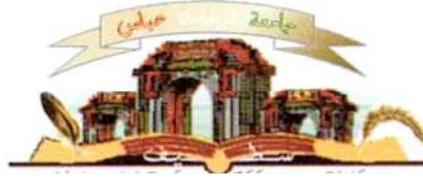


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1
FACULTE DES SCIENCES DE LA
NATURE ET DE LA VIE



جامعة فرحات عباس، سطيف 1-
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

N°/SNV/2018

THÈSE

Présentée par :

LAALA Zahira

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : AGRONOMIE

Spécialité : PRODUCTION ET AMELIORATION DES VEGETAUX

THÈME

Sélection du blé dur (*Triticum turgidum var durum L.*) pour L'adaptation aux
conditions semi-arides

Soutenue publiquement le/...../2018

DEVANT LE JURY

Président	MEKHLOUF Abdelhamid	MCA UFA Sétif 1
Directeur	BENMAHAMMED Amar	Pr. UFA Sétif-1
Co- directeur	BOUZERZOUR Hamenn	Pr. UFA Sétif-1
Examineur	BENBELKACEM Abdelkader	DR. INRAA Constantine
	BENDERRADJI Laid	MCA. UMB M ^o sila
	LAIADI Ziane	MCA. UMK Biskra

Laboratoire de Valorisation des Ressources Biologiques et Naturelles (LVRBN)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1
FACULTE DES SCIENCES DE LA
NATURE ET DE LA VIE



جامعة فرحات عباس، سطيف -1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

N°/SNV/2018

THÈSE

Présentée par :

LAALA Zahira

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : AGRONOMIE

Spécialité : PRODUCTION ET AMELIORATION DES VEGETAUX

THÈME

Sélection du blé dur (*Triticum turgidum var durum* L.) pour L'adaptation aux
conditions semi-arides

Soutenue publiquement le/...../2018

DEVANT LE JURY

Président	MEKHLOUF Abdelhamid	MCA UFA Sétif 1
Directeur	BENMAHAMMED Amar	Pr. UFA Sétif-1
Co- directeur	BOUZERZOUR Hamenn	Pr. UFA Sétif-1
Examineur	BENBELKACEM Abdelkader	DR. INRAA Constantine
	BENDERRADJI Laid	MCA. UMB M ^o sila
	LAIADI Ziane	MCA. UMK Biskra

Laboratoire de Valorisation des Ressources Biologiques et Naturelles (LVRBN)

REMERCIEMENT

Au terme de cette étude, je remercie avant tout Dieu le Tout Puissant, de m'avoir donné le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce travail.

Bien qu'une thèse soit un travail individuel, il y a une bonne quantité de personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce travail et que je tiens à remercier ici.

*Je tiens à remercier vivement Monsieur **Benmahammed Amar**, professeur à l'université de sétif-1, qui a été pour moi un directeur de thèse attentif, positif, encourageant et confiant. Ses qualités et sa rigueur scientifique, au cours de ces années, Sa manière éclairée de voir les choses, son intégrité intellectuelle et son humanisme sont autant de qualités précieuses pour l'encadrement d'une thèse. Je lui dois beaucoup de respects.*

*Je n'ai pas les mots pour remercier mon co-directeur le Professeur **Bouzerzour Hamenna**, de l'université de sétif-1. Avec lui, j'ai tellement appris que ces petits mots me paraissent insuffisants. Sa vitalité et son dynamisme m'ont beaucoup aidée dans ce travail. Il a toujours été là pour moi. Ses conseils et sa patience ne semblent pas avoir de limite. Travailler avec lui a été non seulement une expérience enrichissante, mais aussi personnel. Je remercie, notamment pour sa gentillesse et ses qualités humaines hors-normes. Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect.*

Aux membres du jury :

***Dr Mekhlouf Abdelhamid** MCA à l'université Sétif1 qui m'a honoré en acceptant de présider le jury de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma haute considération. **Dr Benbelkacem Abdelkader** Directeur de Recherche à l'INRAA qui m'a honoré en acceptant d'examiner mon travail. **Dr Benderradji Laid** de l'Université de M'Sila qui m'a fait l'honneur d'être membre de ce jury et a pris sur leurs temps pour lire, examiner et juger ce travail. **Dr Laiadi Ziane** de l'université de Biskra pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Je remercie monsieur **Fellahi zine el abidine** pour son aide et sa grande disponibilité pour les services rendus au cours de la préparation de cette thèse.*

Enfin, merci à tous ceux qui ont rendu possible ce travail, et même s'ils ne se retrouvent pas dans cette petite liste, ils sont dans mes pensées.

Laala Z

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À Mon mari Oulmi Abdelmalek

A mes chères fils : Mohamed yanis et Yahia

*A mes chers parents qui ont toujours été présents et qui par l'éducation qu'ils
m'ont donné m'ont permis d'arriver jusque-là.*

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À tous mes amis et collègues

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer



الملخص:

أجريت هذه الدراسة على مستوى محطة الأبحاث الزراعية للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى (ITGC) خلال الموسمين الزراعيين 2010/2009، 2011/2010. لمتابعة الجيلين الثالث F3 والرابع F4 والمتمثلة في ثلاث هجن من القمح الصلب ناتجة عن تصالب الأصناف أفونتو، محمد بن بشير، واحة، و أم الربيع. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التغيرات الضاهرية والوراثية للجيلين مع تحديد العلاقات الموجودة بين الصفات، والتأثيرات المباشرة والغير مباشرة و تحديد معايير الإنتخاب التي تسمح بتحسين المردود الحبي في الظروف الشبه الجافة. تشير النتائج إلى وجود تباين في الصفات المدروسة وهذا يدل على إمكانية تحسين الخصائص المرغوبة. أظهرت الدراسة وجود تباين وراثي كبير عند الجيلين F4 / F3، وهذا ما تؤكد قيم معاملات التباين الظاهري والوراثي. بينت نتائج الإنحدار التأثير المباشر العالي والإيجابي بالإضافة إلى الإرتباطات المعنوية والإيجابية للكتلة الحيوية، مؤشر عدد السنابل، وعدد الحب في السنبله مع المردود الحبي. كما بينت دراسة الإرتباطات للمتغيرات المقاسة عند الجيلين الثالث والرابع بأن الصفات الأكثر تأثيرا على المردود الحبي هي كل من المردود الاقتصادي، الكتلة الحيوية، عدد ووزن السنابل. أظهر الإنتخاب الغير المباشر للجيل الرابع محدوديته في تحسين المردود نظرا لوجود عدد كبير من المتغيرات المرتبطة به وأيضا لتأثير التفاعل نمط وراثي X بيئة. وفي هذه الحالة يصبح الإنتخاب عن طريق إستعمال المؤشر أكثر فعالية.

الكلمات المفتاحية: قمح صلب، تغير، التحليل التخطيطي، شبه جاف.

Résumé :

La présente étude a été conduite au niveau de la Station Expérimentale Agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif au cours des deux campagnes agricole 2009/2010, 2010 /2011. L'expérimentation porte sur le suivi des générations F_3 et F_4 provenant de trois croisements réalisés entre les variétés Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha et Mrb₅. L'objectif de la présente étude est d'évaluer la variabilité phénotypique créée par croisement chez les générations précoces F_3 et F_4 , analyser les relations qui existent entre les caractères, estimer leurs effets directs et indirects et déterminer les critères de sélection qui peuvent engendrer des améliorations du rendement de blé dur sous conditions semi-arides. Les résultats indiquent la présence de la variabilité pour les caractères étudiés. Ce qui suggère les possibilités d'améliorer les caractères d'intérêt. Les valeurs élevées de l'héritabilité au sens large prises par certains caractères suggèrent qu'il existe des possibilités efficaces de sélection, et qu'ils sont intéressants pour la sélection. Les variances phénotypiques et génotypiques significatives ont été observées en F_3 et F_4 , ceci est confirmé par les valeurs des CVP et CVG. Les résultats de la régression progressive et de l'analyse en chemin montrent que la biomasse, l'indice de récolte et le nombre d'épis et de grains/épi ont des effets directs positifs et élevés associés à des corrélations positives et significatives avec le rendement en grains. L'analyse des corrélations entre les variables mesurées de la génération F_3 qu'en F_4 suggère que les caractères influençant le plus le rendement en grains, le nombre de grains par m² et le rendement économiques, la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis. Les résultats suggèrent qu'en F_4 , la sélection indirecte monocaractère pour améliorer le rendement risque de ne pas être efficace, suite au nombre élevé de variables déterminant ce caractère, la présence de l'interaction génotype x environnements, la ségrégation encore présente à l'intérieur du matériel évalué (F_3 - F_4), et que la sélection sur index serait probablement plus efficace.

Mots clés : Blé dur- sélection- variabilité- analyse en chemin- semi-aride

Abstract :

The present study was conducted at the Field Crop Institute, Agricultural Experimental Station of Setif (ARS-ITGC) during 2010/11 and 2011/12 cropping seasons. The experimental material included the F_3 and F_4 generations derived from crosses made between Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha and Mrb₅ varieties. The objective was to assess the phenotypic variability in early generations, analyze the relationships existed between the traits, estimate their direct and indirect effects and determine the selection criteria that can generate improvements in durum wheat yields under semi-arid conditions. The results indicated the presence of sufficient variability among the studied traits, suggesting the possibilities to improvements. The high values of the broad-sense heritability for some traits suggest that there are effective selection possibilities, and these traits are interesting for selection. Significant phenotypic and genotypic variances were observed in F_3 and F_4 , this result was confirmed by the PCV and GCV values. The results of the stepwise regression and path analysis showed that the biomass, the harvest index, the number of spikes and the number of grains/spike had positive and high direct effects associated with positive and significant correlations with the grain yield. The analysis of correlations between the measured variables of the F_3 and F_4 generations suggested that the number of grains per m², the economic yield, the above-ground biomass, the number of spikes and the spikes weight were the most grain yield influencing traits. These results suggest that the indirect single-trait selection to improve yield may not be effective in F_4 , due to the large number of variables determining this trait, the presence of the genotype x environments interaction and the segregation present in the evaluated material (F_3 - F_4). The selection based-index could be more effective.

Key words: Durum wheat- selection- variability- path analysis-semi-arid

SOMMAIRE

Contenu	Page
REMERCIEMENT	
DEDICACE	
RESUME	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS	
<i>CHAPITRE 1 : Introduction et Revue bibliographique</i>	
Introduction	01
1. ORIGINES GENETIQUE, GEOGRAPHIQUE ET IMPORTANCE DU BLE DUR	03
2. SUPERFICIES ET PRODUCTION DU BLÉ DUR	04
2.1. DANS LE MONDE	04
2.2. EN ALGÉRIE	05
3. CONTRAINTES ABIOTIQUES DU MILIEU DE PRODUCTION ET EFFET SUR LA PLANTE	06
4. STRATEGIES DE LA PLANTE POUR CONTRER LE STRESS	09
5. IDEOTYPE TOLERANT LES STRESS HYDRIQUE ET THERMIQUE	11
6. SELECTION DU BLE DUR	13
6.1. SELECTIONS DIRECTE ET INDIRECTE	13
<i>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES</i>	
1. MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION	26
2. VARIABLES MESUREES	27
3. ANALYSE DES DONNEES	28
<i>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION</i>	
1. CONDITIONS CLIMATIQUES DES ANNEES D'ETUDES	30
1.1. PLUVIOMETRIE	30
1.2. TEMPERATURE MOYENNE	32
2. VARIABILITE ET HERITABILITE DES CARACTERES DES GENERATIONS F3 ET F4	34

2.1. BIOMASSE, PAILLE ET POIDS DES EPIS	34
2.1.1. GENERATION F3	34
2.1.2. GENERATION F4	37
2.2. HAUTEUR ET DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE	41
2.2.1. GENERATION F3	41
2.2.2. GENERATION F4	42
2.3. COMPOSANTES DU RENDEMENT EN GRAINS	45
2.3.1. GENERATION F3	45
2.3.2. GENERATION F4	48
2.4. RENDEMENTS GRAIN, ECONOMIQUE ET INDICE DE RECOLTE	51
2.4.1. GENERATION F3	51
2.4.2. GENERATION F4	54
3. LIAISONS DES CARACTERES INTRA ET INTER GENERATIONS	56
3.1. LIAISONS EN F3	56
3.2. LIAISONS ENTRE CARACTERES EN F4	60
4. EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS INTRA GENERATION	62
4.1. DETERMINANTS DE LA BIOMASSE AERIENNE EN F3	62
4.2. DETERMINANTS DU RENDEMENT EN GRAINS EN F3	65
4.3. DETERMINANTS DE LA BIOMASSE AERIENNE EN F4	69
4.4. DETERMINANTS DU RENDEMENT EN GRAINS EN F4	71
5. DEGRE DE RESSEMBLANCE ENTRE GENERATIONS F3-F4	74
6. REGRESSION PARENTS-DESCENDANCE	78
7. DIFFERENTIELLE DE SELECTION, REponses DIRECTE ET CORRELATIVES EN F4 A LA SELECTION EN F3	79
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	89
REFERENCES	92
ANNEX	103

LISTE DE TABLEAUX

	Page
Tableau 1. Variation du degré d'homozygotie d'un seul locus au cours des premières générations en ségrégations.	22
Tableau 2. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la biomasse aérienne, de la paille produite et du poids des épis de la génération F3.	35
Tableau 3. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la biomasse aérienne, de la paille produite et du poids des épis de la génération F4.	38
Tableau 4. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la hauteur de la plante et de la durée de la phase végétative de la génération F3.	41
Tableau 5. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la hauteur de la plante et de la durée de la phase végétative de la génération F4.	42
Tableau 6. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des composantes du rendement de la génération F3.	46
Tableau 7. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des composantes du rendement de la génération F4.	50
Tableau 8. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des rendements en grains et économiques et de l'indice de récolte de la génération F3.	52
Tableau 9. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des rendements en grains et économiques et de l'indice de récolte de la génération F4.	55
Tableau 10. Coefficients de corrélation phénotypes entre les valeurs prises par les variables mesurées de la génération F3.	57
Tableau 11. Coefficients de corrélation phénotypes entre les valeurs prises par les variables mesurées de la génération F4.	61

Tableau 12. Régression de la biomasse aérienne sur les variables pertinentes de la génération F3.	63
Tableau 13. Effets directs (en gras) et indirects des variables déterminantes de la biomasse aérienne de la génération F3.	64
Tableau 14. Régression du rendement en grains sur les variables pertinentes de la génération F3.	66
Tableau 15. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes du rendement en grains de la génération F3.	67
Tableau 16. Régression de la biomasse aérienne sur les variables pertinentes de la génération F4.	70
Tableau 17. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes de la biomasse aérienne de la génération F4.	71
Tableau 18. Régression du rendement en grains sur les variables pertinentes de la génération F4.	72
Tableau 19. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes du rendement en grains de la génération F4.	73
Tableau 20. Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les générations F3-F4 des différentes variables mesurées.	75
Tableau 21. Coefficients de régression de la génération descendante F4 sur la génération parentale F3 et héritabilité au sens étroit des différentes variables mesurées.	78
Tableau 22. Différentielle de sélection (S) en F3, Réponse directe (R) et Corrélative de la sélection (CR) et héritabilité réalisée, en F4, des caractères utilisés comme critères de sélection en F3.	80

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1. Variabilité phénotypique en F1 et en F2.	23
Figure 2. Variabilité phénotypique en F3.	23
Figure 3. Pluviométrie et température moyenne mensuelles enregistrées au cours des campagnes d'études sur le site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif.	31
Figure 4. Pluviométries et températures moyennes saisonnières du site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif enregistrées au cours des campagnes d'études.	32
Figure 5. Cycle bimodale de la variation des moyennes de la température moyenne saisonnière du site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif enregistrées au cours des campagnes d'études.	33
Figure 6. Variabilité phénotypique de la biomasse aérienne des générations F3 et F4.	35
Figure 7. Variabilité phénotypique du poids des épis des générations F3 et F4.	39
Figure 8. Valeurs moyennes caractéristiques de la biomasse, de la paille produite et du poids des épis des générations F3 et F4.	39
Figure 9. Valeurs moyennes caractéristiques de la hauteur de la plante des générations F3 et F4.	43
Figure 10. Valeurs moyennes caractéristiques de la durée de la phase végétative des générations F3 et F4.	44
Figure 11. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre d'épis/m ² des générations F3 et F4 ² .	46
Figure 12. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains par épi des générations F3 et F4.	47
Figure 13. Valeurs moyennes caractéristiques du poids de 1000 grains des générations F3 et F4.	47
Figure 14. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains /m ² des générations F3 et F4.	48
Figure 15. Valeurs moyennes caractéristiques du rendement en grains des générations F3 et F4.	53
Figure 16. Valeurs moyennes caractéristiques du rendement économique des générations F3 et F4.	53
Figure 17. Valeurs moyennes caractéristiques de l'indice de récolte des générations F3 et F4.	54
Figure 18. Ressemblance entre les lignées F3 et leurs descendants F4 pour la hauteur de la végétation.	76
Figure 19. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées L relativement aux 20 lignées H (100*L/H), sélectionnées sur la base de la hauteur de la végétation.	81
Figure 20. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L (100*H/L), sélectionnées sur la base du nombre d'épis par unité de surface emblavée.	82
Figure 21. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L (100*H/L), sélectionnées, en F3, sur la base du poids de 1000 grains.	83
Figure 22. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4,	84

chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L (100*H/L), sélectionnées, en F3, sur la base de l'indice de récolte.	
Figure 23. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées L relativement aux 20 lignées H (100*L/H), sélectionnées, en F3, sur la base de la durée de la phase végétative.	85
Figure 24. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L (100*H/L), sélectionnées, en F3, sur la base du rendement en grains.	86
Figure 25. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L (100*H/L), sélectionnées, en F3, sur la base du rendement en grains.	87

ANNEX

	Page
Tableau Annex1. Moyennes décennales (2006-2015) de la production (tonnes) et du rendement à l'hectare (tonne/ha) du blé dur des principaux pays producteurs	102

LISTE DES ABREVIATIONS

CM	Carré moyen
CV	Coefficient de variation
CVG	Coefficient de variation génotypique
CVP	Coefficient de variation phénotypique
DPV	Durée de phase végétative
ICARDA	International Center for Agricultural Research in the Dry Areas
ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
CIMMYT	International Maize and Wheat Improvement Center
CIC	Centre Internationale d'Amélioration du maïs et du blé du Mexique
S	Différentielle de la sélection
RDT	Rendement grain
BIO	Biomasse aérienne
NGM²	Nombre de grains par mètre carré
NE	Nombre d'épi
NGE	Nombre de grains par mètre carré
PMG	poids de 1000 grains
PE	Poids des épis
RDT_{EC}	Rendement économique
HI	Indice de récolte (harvest index)
RS	Réponse à la sélection
Ppds_{5%}	Plus petite différence significative
h²	Degré d'héritabilité au sens large
σ²p	Variance phénotypique
σ²g	Variance génotypique
σ²e	Variance environnemental
LAI	l'indice foliaire
LAD	la sénescence foliaire
HT	la hauteur
RDT_{PLL}	le rendement paille
P	probabilité
SCE	somme des carrés des écarts
CME= MS	carré moyen des écarts
F	test de fisher

CR	la réponse corrélative à la sélection du rendement en grains
RSE	efficacité de la sélection
Cm²	mètre carré
Mt	million de tonne
b	coefficient de régression
SE	erreur standard du coefficient de régression
t	calculé pour le coefficient de régression
Sh²	produit entre la différentielle de la sélection et l'héritabilité
Df =Ddl	degré de liberté
SS=SCM	somme des carrés des écarts
MS=CME	carré moyen des écarts
R	réponse directe attendues

Introduction

La recherche de l'amélioration du potentiel de rendement et de l'adaptation à la variation du milieu est une nécessité suite aux effets prévisibles des changements climatiques qui accentueront l'action des stress abiotiques sous les conditions des pays du sud de la méditerranée. Dans un environnement où les disponibilités du milieu, notamment l'eau, risquent de devenir plus restreintes, il faut identifier des génotypes capables de s'adapter et de produire plus. Dans ce contexte plusieurs chercheurs dont Trethowan *et al.*, (2002), Araus *et al.*, (2002) et Slafer et Araus, (2007) suggèrent de chercher l'efficacité génotypique, notamment la réponse des génotypes aux stress abiotiques dont entre autre le déficit hydrique et les hautes températures de fin de cycle.

Quoique l'amélioration génétique est responsable pour 50% de l'augmentation des rendements (Araus *et al.*, 2002; Reynolds et Tuberosa, 2008), sous les conditions relativement moins favorables, l'adaptation apparaît comme une nécessité pour stabiliser la production. Dans ce contexte, la durée du cycle, la hauteur de la plante et la biomasse accumulée ont des effets directs significatifs sur le potentiel de rendement.

L'approche classique pour l'amélioration du potentiel de rendement des céréales utilise les croisements entre des lignées parentales complémentaires et le suivi de centaines voire des milliers de lignée ségrégantes qui en descendent, pour identifier les plus adaptées et les plus performantes pour les environnements ciblés (Martin and Geraldi, 2002).

Cette démarche a abouti à l'amélioration des performances de rendement, notamment en milieux favorables, en utilisant comme critère de sélection le rendement en grains (Martin and Geraldi, 2002). Elle est cependant longue et onéreuse. Les sélectionneurs sont donc à la recherche d'outils d'aide à la sélection qui soient plus efficaces et moins faciles d'application (Reynolds *et al.*, 2012). En effet il

est très intéressant si l'outil d'aide à la sélection indirecte identifie les meilleurs génotypes rapidement et de manière efficace suite au criblage d'un nombre assez important de ségrégants (Mühleisen *et al.*, 2013).

L'utilisation des caractères morphologiques et/ou physiologiques comme critères de sélection pour différencier les performances des lignées testées est une approche qui retient l'attention des sélectionneurs et physiologistes (Reynolds *et al.*, 2012 ; Mühleisen *et al.*, 2013). Elle est cependant plus limitée suite au fait que la relation entre ces caractéristiques et le potentiel de rendement est complexe et variable dans l'espace et dans le temps (Oulmi *et al.*, 2014 ; Haddad *et al.*, 2016).

L'existence de la variabilité de réponses physiologiques de la plante aux stress abiotiques est nécessaire pour que le sélectionneur puisse faire un progrès quelconque en matière d'amélioration de la résistance et de l'augmentation du potentiel de rendement sous conditions variables.

La culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) est confrontée, en zones semi-arides, à des stress abiotiques de nature intermittente, avec des effets plus accentués en fin de cycle de la plante. Les stratégies d'esquive et d'évitement sont efficaces dans ce domaine mais elles restent insuffisantes (Mekhlouf *et al.*, 2006 ; Slafer et Araus, 2007; Reynolds et Tuberosa, 2008 ; Nouar *et al.*, 2010).

Les objectifs de ce travail sont l'évaluation de la variabilité phénotypique, l'analyse des relations existantes entre les caractères et d'estimer le degré d'héritabilité et la réponse attendue de la sélection directe et indirecte chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) pour l'adaptation aux conditions semi-arides.

CHAPITRE I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. ORIGINES GENETIQUE, GEOGRAPHIQUE ET IMPORTANCE DU BLE DUR

L'origine des blés semble avoir débuté il y a quelque dix mille années, lorsque l'espèce sauvage *Triticum urartu* (einkorn) se croisa spontanément avec l'espèce *Aegilops spelta* (goat grass) pour produire le blé dur sauvage *Triticum diccocoïdes* (Emmer). Ce dernier, après un croisement spontané avec l'espèce sauvage *Aegilops squarosa* (synonyme *Triticum tauschii*), donna naissance au blé tendre *Triticum spelta*, l'ancêtre de *Triticum aestivum* L.

Après leur domestication par les peuplades de chasseurs- cueilleurs, les blés dur et tendre se sont diversifiés dans leur centre d'origine géographique, connu sous le nom de croissant fertile, et le long les routes de leur dispersion vers l'Afrique, l'Asie et l'Europe (Feldmann, 2001). Des études cytologiques et cytogénétiques indiquent que les blés forment une série d'espèces diploïdes, tétraploïdes et hexaploïdes avec un nombre basique de 7 chromosomes ($X= 7$) et portant, respectivement, les génomes suivant A, AB et ABD (Feldmann, 2001).

A l'intérieur des formes tétraploïdes, le genre *Triticum dicoccum* est le premier à être domestiqué, suivi par les genres *Triticum durum*, *Triticum turgidum* et *Triticum polonicum* qui en dérivent par mutation qui se distinguent par un rachis fragile et des graines déhiscentes (Kimber et Sears, 1987). Le genre *Triticum durum* est la forme tétraploïde la plus cultivée, comme l'est le genre *aestivum* pour la forme hexaploïde (Hanson *et al.*, 1982).

2. SUPERFICIES ET PRODUCTION DU BLÉ DUR

2.1. DANS LE MONDE

La culture du blé dur est historiquement associée au climat méditerranéen de l'Afrique du nord le sud européen, la Turquie et la Syrie (Hannachi, 2013). On la trouve aussi localisée, en Amérique du nord, dans les régions arides des Dakotas, du Montana, aux Etats Unis, et le sud du Saskatchewan et l'Alberta au Canada (Arduini *et al.*, 2006). La production de cette espèce, au niveau mondiale, avoisine les 35 millions de tonnes, ce qui représente 5% de la production mondiale des blés dur et tendre (Arduini *et al.*, 2006). La superficie réservée à cette espèce est de 14 millions d'hectares, en moyenne. Les rendements moyens les plus élevés sont atteints au Mexique (5.3 t/ha), en France (5.0 t/ha), en Italie (2.9 t/ha), en Syrie (2.7 t/ha), et en Inde (2.6 t/ha). La deuxième grande zone de production est celle des plaines intérieures du nord de l'Amérique du Nord (USA et Canada). Vaste territoire de culture du blé dur qui comprend les Dakotas, le Montana, le Saskatchewan et l'Alberta. La production totale de blé dur, cycle de printemps, de ce territoire se situe chaque année entre 6.5 à 8.0 millions de tonnes. Le Canada est le plus gros producteur mondial de blé dur et la production annuelle varie entre 4,5 à 6 millions de tonnes (Ranieri, 2015).

La production du bassin méditerranéen varie considérablement car elle est dépendante de la pluie (Tab Annex1, Ammar, 2015). En Afrique du Nord et en Europe du Sud, les rendements sont fortement influencés par la sécheresse. Les besoins en blé dur des pays du bassin méditerranéen sont supérieurs à ce qu'ils produisent ; ce qui fait que chaque année, plus de 5 millions de tonnes sont acheminés vers ces pays, venant pour la plupart des USA et du Canada.

La consommation totale du blé est stable et est maintenu à 688 millions de tonnes en 2014 du fait d'une consommation de 2 % que connaît l'utilisation à des fins

d'alimentation animale, à laquelle s'ajoute l'offre abondante de céréales secondaires affichant des prix plus compétitifs, vient contrebalancer la hausse de 1,4 % de l'utilisation à des fins d'alimentation humaine (FAO, 2013). Les stocks de blé sont de 180 millions de tonnes en 2014, soit une hausse de 14 pour cent (22 millions de tonnes) par rapport à l'année 2013.

2.2. EN ALGÉRIE

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

En termes de superficies et de production, en Algérie le blé dur occupant la moitié d'une superficie de 3 millions hectares, destinés à la céréaliculture. La production qui avoisine les 1.6 millions de tonnes ne couvre que 30 à 35% des besoins. La cause principale de la faiblesse de la production est le bas niveau des rendements atteint actuellement et qui, quoiqu'en augmentation depuis 1990, reste en deçà de ce qu'il devrait être, ne dépassant pas une moyenne de 1.5 t/ha (Zahid, 2010). La majeure partie des emblavures du blé dur est concentrée sur les hautes plaines, région caractérisée par de l'altitude (700 à 1100 m), des hivers froids, un régime pluviométrique faible et irrégulier, associés à l'apparition de vents chauds et desséchants en fin de cycle de la culture (Chennafi *et al.*, 2006). Les changements climatiques risquent d'exagérer l'effet de ces contraintes qui s'ajoutent aux contraintes d'ordre techniques qui relèvent de l'application d'itinéraires techniques souvent peu ambitieux et de l'utilisation de variétés non adaptées (Bahlouli *et al.*, 2005).

L'Algérie, pays exportateur de blé durant l'ère romaine et française, est devenue l'un des plus gros importateurs au monde de cette céréale. Les habitudes alimentaires de l'algérien (couscous, pâtes, pain et frik) font de lui un grand consommateur de cette denrée (Benbelkacem *et al.*, 1995). Afin de combler le déficit en produits céréaliers, l'Algérie recourt à des importations, à partir de la France, des Etats Unis, du Canada et de l'Argentine qui sont les principaux fournisseurs (Rastoin et Benabderrazik, 2014). L'évolution moyenne de la production du blé, de l'importation et de la consommation au cours de ces onze dernières années est de l'ordre de 2,8MT, 5,7MT et de 8,3MT respectivement (CIC, 2014). Pour répondre aux besoins d'une population en croissance, le pays importe de grandes quantités de blé et figure parmi les grands importateurs mondiaux de blé. Les importations représentent plus du double de la production nationale.

Actuellement l'Algérie se classe au premier rang mondial pour la consommation de blé avec une moyenne dépassant largement les 200kg/ha/an, comparativement à l'Egypte dont la moyenne est de 131 kg/ha/an et la France dont la moyenne est de 98 kg/ha/an (Faostat, 2005). La croissance démographique, le changement de modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, ont fait que le volume des céréales consommées a augmenté de 427%, entre 1961 et 2003, passant de 1,2 millions de tonnes à 6,4 millions de tonnes (Faostat, 2005).

3. CONTRAINTES ABIOTIQUES DU MILIEU DE PRODUCTION ET EFFET SUR LA PLANTE

La production mondiale des céréales est essentiellement limitée par les stress environnementaux. Il est même rare de trouver un environnement sans stress où le potentiel de production est atteint. Parmi ces stress, la sécheresse cause des effets importants sur le développement de la plante et sa capacité de production (Richards *et al.*, 2002). C'est une contrainte permanente de la céréaliculture dans plusieurs pays, notamment ceux des zones arides et semi-arides (Ceccarelli *et al.*, 1998).

Dans ces régions, les précipitations sont le plus souvent inférieures à l'évapotranspiration potentielle. Le déficit hydrique qui s'y instaure entraîne au niveau de la plante une diminution de la quantité d'eau absorbée en comparaison avec la quantité d'eau évaporée.

Plus la différence entre ces deux variables est grande plus l'effet sur le rendement est important en comparaison avec ce qui observé en situation relativement moins stressante (Voltas *et al.*, 2005; Tardieu *et al.*, 2007). En effet, l'eau joue un rôle prépondérant dans la production vu qu'une culture irriguée produit plus de trois fois le rendement de celle conduite en pluvial (Chennafi *et al.*, 2006).

Les effets négatifs des stress hydrique et thermique, sur les cultures, seront à l'avenir plus exagérés suite aux changements climatiques attendus. En effet les modèles de prévisions climatiques prévoient une augmentation de la température de l'ordre de 2-3°C voire 4°C, notamment lors de la saison chaude qui correspond la période de reproductive de la céréale (Barnabas *et al.*, 2008).

Les effets de ce réchauffement climatique se manifestent par un raccourcissement du cycle, un effet sur la demande climatique ce qui exagère l'évaporation et un accroissement du déficit de saturation de l'air (Barnabas *et al.*, 2008). Les précipitations seront moins importantes mais aussi avec des risques accrus d'événements extrêmes (Barnabas *et al.*, 2008).

Sous ces conditions la production et les rendements varient fortement d'une année à l'autre et d'une localité à l'autre et voire même d'une date de semis à l'autre, conduisant à l'instabilité des rendements (Nouar *et al.*, 2012 ; Bendjamaa *et al.*, 2014 ; Haddad *et al.*, 2016). Le manque d'eau ou déficit hydrique est de nature intermittente pouvant survenir à n'importe quel stade végétatif de la plante, malgré qu'il soit plus fréquent en fin de cycle de la culture moment où se détermine le rendement notamment le remplissage du grain (Chennafi *et al.*, 2006).

Outre la baisse du rendement, le déficit hydrique affecte l'intégrité de la membrane plasmique, le contenu en chlorophylle, et l'activité photosynthétique (Praba *et al.*, 2009 ; Oulmi *et al.*, 2014). En effet le déficit hydrique induit une variété de réponses de la part de la plante, qui vont de l'altération de l'expression des gènes, en passant par l'altération du métabolisme cellulaire, la réduction de la croissance et la baisse de la production.

Selon Harris *et al.*, (2002), les stress hydrique et thermique affectent significativement la germination et l'installation de la culture. La croissance cellulaire est considérée comme le processus physiologique de la plante le plus sensible au stress hydrique qui réduit la turgescence.

La croissance est la résultante de la production des cellules filles par les cellules méristématique, suivie de leur division et élongation. Sous stress hydrique sévère l'élongation cellulaire est inhibée, avec des effets négatifs sur la croissance globale de la plante (Harris *et al.*, 2002). Ainsi selon Hussain *et al.*, (2008) le déficit hydrique réduit l'émission foliaire, de la taille des feuilles émises, leur durée de vie et de l'activité photosynthétique.

L'effet le plus perceptible du déficit hydrique sur la croissance est la réduction des poids frais et sec des plantes (Zhao *et al.*, 2009). Kamara *et al.*, (2003) mentionnent que le déficit hydrique imposé aux stades végétatifs épiaison et remplissage du grain réduit du rendement de 37 et 34% respectivement. L'importance de l'impact de cette contrainte sur la production céréalière explique les efforts entrepris par les sélectionneurs pour développer des variétés qui tolèrent mieux et minimisent la baisse de rendement en présence de ce type de stress.

4. STRATEGIES DE LA PLANTE POUR CONTRER LE STRESS

Selon Barnabas *et al.*, (2008), faisant référence à Levitt (1982) , au cours de leur évolution, les plantes ont développé trois stratégies, l'esquive, l'évitement et la tolérance, pour minimiser les effets des stress abiotiques. La modulation de la durée de son cycle de vie permet à la plante d'esquiver, plus ou moins, le stress au pic de son avènement. Elle minimise ainsi les dégâts causés par le stress.

Le prix à payer pour l'adoption de cette stratégie est que la plante ne peut pas réaliser son potentiel de rendement, elle arrive, cependant, à faire un rendement acceptable pour la situation de stress subi (Chaves *et al.*, 2003 ; Barnabas *et al.*, 2008). Pour les stress de type cyclique, la sélection d'une plus grande précocité d'épiaison et à maturité a été la plus usitée et la plus efficiente chez les céréales (Mekhlouf *et al.*, 2006).

Les plantes qui se distinguent par la stratégie d'évitement, arrivent à maintenir l'hydratation de leurs tissus grâce à la présence de caractères adaptatifs qui permettent soit de réduire la perte en eau (contrôle stomatique) ou qui améliorent l'absorption de l'humidité à partir du sol.

Dans ce dernier cas, il y a dérivation et investissement des assimilats produits en priorité pour la croissance en profondeur des racines à la recherche de l'humidité, nécessaire au maintien d'un potentiel hydrique élevé. Dans ce cas la plante est en situation de confort hydrique alors que l'environnement extérieur est stressant (Chaves *et al.*, 2003 ; Barnabas *et al.*, 2008).

La sélection d'un système racinaire apte à croître en profondeur est une voie à exploiter pour utiliser cette stratégie. Les difficultés de mesure de la croissance racinaire et donc de sélectionner cette caractéristique font que cette stratégie a été peu mise à profit en amélioration des plantes (Sharp *et al.*, 2004).

La minimisation des pertes d'eau sous stress, se fait en principe au détriment de l'assimilation chlorophyllienne, vu que la plante échange le carbone contre l'eau. Il y a forcément réduction du rendement. L'utilisation de cette stratégie est approchée par la sélection des feuilles aux faibles dimensions (Benmahammed *et al.*, 2008), la capacité d'enroulement du feuillage sous stress, et le dessèchement précoce des feuilles âgées.

Chez les plantes économes en eau, l'évitement de la déshydratation est lié à la réduction des pertes d'eau par les voies cuticulaire et stomatique. De ce fait la recherche d'indicateurs de la capacité de la plante à faire une bonne utilisation de l'eau, sous stress hydrique, est un préalable à la réalisation de progrès en matière d'amélioration du rendement sous contrainte hydrique (Blum *et al.*, 1999 ; Araus *et al.*, 2002). La sélection de variétés dont la feuille étendard a de faibles dimensions permet d'identifier des génotypes qui évitent le stress hydrique (Benmahammed *et al.*, 2008). Cette stratégie permet donc une survie au détriment de la productivité.

Les plantes tolérantes utilisent le processus d'ajustement osmotique pour maintenir la turgescence et ainsi assurer le maintien des fonctions physiologiques nécessaire à la croissance, malgré la présence du déficit hydrique (Chaves *et al.*, 2003). Les solutés compatibles comme la proline, la glycine-bétaïne, et les sucres sont largement utilisés dans le processus d'ajustement par les variétés tolérantes (Hamli *et al.*, 2015). Ceci implique des ajustements osmotiques qui sont rendus possible grâce à la rigidité des parois cellulaires et aux faibles dimensions des cellules.

La tolérance à la sécheresse est aussi associée à une élimination efficace des espèces réactives de l'oxygène formées lors de la perturbation du métabolisme lorsque la luminosité est élevée (Barnabas *et al.*, 2008 ; Chaves *et al.*, 2003). Ces adaptations permettent le maintien du rendement maximal mais ont tendance à augmenter le risque de perte totale de rendement. Elles sont favorables en conditions

modérément sèches, mais pourraient s'avérer contre-productives en situation de déficit hydrique sévère (Barnabas *et al.*, 2008 ; Chaves *et al.*, 2003).

Les résultats de Fellah *et al.*, (2002), comme ceux de Bahlouli *et al.*, (2005) indiquent que la sélection pour la tolérance induit, certes, une baisse des rendements sous contrainte, mais cette baisse est cependant moins importante chez les génotypes tolérants comparativement à celle notée chez les génotypes sensibles.

Les résultats de Benmahammed *et al.*, (2008) indiquent que parmi les génotypes étudiés, Waha réagit, au déficit hydrique, par une réduction significative de la surface de la feuille étandard et une sensibilité plus accrue de la membranaire plasmique, tout en maintenant une capacité élevée de production de biomasse aérienne.

Par contre Bousselam/Ofanto réagit par une réduction de la teneur relative en eau, une tolérance membranaire élevée, associée à une bonne capacité d'accumulation de la biomasse. Ces deux variétés testées diffèrent peu pour l'efficacité d'utilisation de l'eau (Benmahammed *et al.*, 2008). Ces résultats suggèrent qu'une production élevée de biomasse sous stress est un indicateur de génotypes économes en eau. La biomasse est donc un excellent critère de sélection, sous contrainte hydrique, pour favoriser les génotypes qui tolèrent le manque d'eau.

5. IDEOTYPE TOLERANT LES STRESS HYDRIQUE ET THERMIQUE

Les résultats de la sélection ainsi que ceux des travaux relative à la physiologie de la plante orientent vers un modèle conceptuel de plante qui serait plus résiliente vis-à-vis des stress. Les caractères, les plus saillants, d'un tel modèle de plante, selon Reynolds *et al.*, (2011), sont :

- des graines de larges dimensions pour assurer une bonne levée.

- Un long coléoptile pour que la plantule puisse avoir accès à l'humidité et lever sous conditions de semis profond et en sec, comme c'est le cas sous conditions semi-arides.
- Une levée rapide et une installation précoce, qui permettent à la plante de couvrir rapidement le sol et ainsi limiter l'évaporation directe, et ainsi réservant l'humidité du sol pour la seule utilisation de la plante cultivée. Cette capacité est associée à des feuilles larges et de faible épaisseur, présentant un faible poids spécifique foliaire.
- Une biomasse aérienne élevée au stade épiaison, qui est indicatrice d'une bonne utilisation des eaux de pluie reçues en hiver. A ce stade une biomasse élevée permet la réalisation d'un rendement acceptable.
- La capacité de remobilisation des assimilés et qui est associée à la longueur du col de l'épi, à la hauteur de la plante et la longueur de l'extrusion, ainsi que le poids spécifique des entre-nœuds (Belkherchouche *et al.*, 2015).
- Des épis aux larges dimensions et arborant de longues barbes, parce que l'épi est généralement le dernier organe qui reste en activité photosynthétique. Les résultats de Belkherchouche *et al.*, 2015 indiquent que l'ombrage de l'épi réduit de 21% le rendement de l'épi comparativement au témoin non stressé, alors que l'ablation des barbes réduit le rendement de 18%.
- Un faible dessèchement de la feuille étendard ce qui maintient l'activité photosynthétique au cours de la phase de remplissage du grain. Ce trait est associé à une teneur en chlorophylle élevée. Dans ce contexte, les résultats de Oulmi *et al.*, (2014) indiquent que le contenu en chlorophylle présente une faible variabilité, une héritabilité juste moyenne et qu'il n'est pas lié au rendement en grain. Il est donc peu utile comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains. Un faible dessèchement de la feuille étendard est lié à la teneur relative en eau, qui est une caractéristique intéressante en sélection.

- Le maintien d'une capacité élevée de tallage épis est désirable sous stress hydrique.

Des résultats expérimentaux suggèrent que lorsque la variabilité environnementale est élevée suite à des différences imprévisibles dans la fréquence, le moment et la sévérité des stress climatiques, il y a différentes combinaisons de caractères qui sont susceptibles de conférer l'adaptation aux stress (Ceccarelli *et al.*, 2010 ; Fellah *et al.*, 2002 ; Benmahammed *et al.*, 2008 ; Nouar *et al.*, 2010 ; Bensemmane *et al.*, 2011 ; Belkherchouche *et al.*, 2015).

En fait il n'y a pas une seule combinaison idéale de caractères pour un environnement variable. Au contraire différentes combinaisons de caractères peuvent conduire à un même niveau de rendement en grains sous stress (Hamli *et al.*, 2015 ; Belkherchouche *et al.*, 2015).

L'identification des combinaisons de caractères, les plus fréquentes et les plus liées au rendement dans le milieu ciblé est souhaitable pour réaliser du progrès dans ce domaine. De plus, le frein à la réalisation d'un progrès de rendement en grains significatif, sous stress, résulte de la variation du degré d'expression de la multitude de caractères qui conditionnent le rendement dans de tels milieux (Meziani, 2016 ; Haddad *et al.*, 2016).

6. SELECTION DU BLE DUR

6.1. SELECTIONS DIRECTE ET INDIRECTE

La sélection a bien évolué et recouvre actuellement un ensemble d'activités techniques et scientifiques très diversifiées. Ses objectifs ne sont pas uniquement d'obtenir de bons rendements, avec des variétés bien adaptées aux techniques culturales hautement mécanisées mais également d'améliorer les facteurs de régularité de ce rendement et la qualité technologique du produit. Le sélectionneur devra donc réunir dans un même génotype des caractères souvent antagonistes

comme une production élevée et régulière et une haute teneur en protéines (Picard, 1988).

Comme dans tout programme de sélection créatrice, l'obtention de ce génotype passe par deux étapes successives : -la création de la variabilité qui concerne la recherche d'individus susceptibles d'apporter les caractères voulus, pour cela une série de croisements est initiée entre des géniteurs pour permettre l'introduction de la variabilité génétique. - la sélection et la stabilisation des hybrides les plus prometteurs (Bonjeon et Picard, 1990).

La sélection débute par le criblage de la génération F₂, issue de l'autofécondation des F₁. Le tri est fait par plante, dans le cas de la sélection pedigree, et/ou par croisement (ou famille). Ce tri est fait sur la base des caractères à hérédité simple. Il est repris en F₃ à F₇, jusqu'à l'obtention d'un matériel végétal plus ou moins homogène où la ségrégation est très faible à nulle dans lequel la sélection directe pour le rendement est pratiquée. La sélection directe pour le rendement a eu peu de succès, de sorte que les sélectionneurs cherchent d'autres caractères qui peuvent être plus efficaces dans le processus de sélection. La sélection directe utilise le rendement lui-même comme base de sélection. La difficulté d'identifier et de caractériser les paramètres de la résistance au stress hydrique chez les plantes, à travers l'observation d'un caractère phénotypique complexe et de faible héritabilité (Hannachi, 2017).

Selon Gill *et al.*, 1979; Simmond, 1991 et Ceccarelli *et al.*, 1992, le rendement est un caractère quantitatif complexe, sa variation est sous un contrôle polygénique de nature non additive. Il est plus soumis à la variation environnementale. L'instabilité des rendements en grains observée chez le matériel végétal issue de la sélection directe a exigé la recherche d'autres méthodes et critères de sélection qui pourraient s'avérer plus efficaces dans l'amélioration de la régularité (Bouzerzour, 1998). Cependant, la stabilité du rendement d'une variété dans les environnements

défavorables s'explique par ses origines génétiques : cette variété est en effet issue de parents anciens et locaux qui ont acquis cette adaptation à travers une évolution très longue sous les conditions locales (Sayar *et al.*, 1992).

L'inefficacité de la sélection directe s'explique par la présence de l'interaction génotype x environnement (Bouzerzour et Djekoun, 1998; Annicchiarico *et al.*, 2005; Kadi *et al.*, 2010; Meziani *et al.*, 2011; Nouar *et al.*, 2012; Haddad *et al.*, 2016).

comme le rendement en conditions de déficit hydrique, a conduit à s'intéresser à la sélection indirecte qui utilise les composantes du rendement et les caractères morpho-physiologiques qui sont liés au rendement grain (Reynolds *et al.*, 2007; Adjabi *et al.*, 2007; Bensemane *et al.*, 2011).

La sélection indirecte est une méthode plus analytique, basée sur l'utilisation des caractères phéno-morpho- physiologiques intervenant dans le déterminisme du rendement potentiel et de la tolérance aux stress abiotiques des céréales a été proposée par Monneveux (1991). La stratégie de recherche retenue prévoit plusieurs étapes assurant une connaissance suffisante de la physiologie des mécanismes de tolérance suivie de l'étude de la génétique de ces caractères avant de passer à leur utilisation en sélection. Les améliorateurs ont donc procédé à une sélection indirecte en utilisant d'autres caractères de la plante liés au rendement tels que les caractères morphologiques (col de l'épi, longueur de la tige, surface foliaire, etc.), ou les composantes du rendement comme critères de sélection. NASR (1994) a suggéré que le rendement en grains puisse être augmenté en sélectionnant pour les composantes du rendement. Toutefois, le choix de l'une ou l'autre des composantes doit dépendre de son degré de liaison avec le rendement. Par ailleurs, les variétés sélectionnées sur la base du rendement en grains ont montré leurs performances en bonnes années mais ont réagi défavorablement en années difficiles.

La sélection classique, la plus utilisée, consiste à effectuer des croisements entre des parents choisis, puis à sélectionner des génotypes favorables parmi la descendance constituée de centaines voire des milliers d'individus, au cours des différentes générations (Acquaah, 2007). Les descendants présentant les caractères recherchés sont sélectionnés sous conditions favorisant les plantes tolérantes au stress considéré. Elle exploite la variabilité existante au sein du croisement réalisé et portée par les parents croisés.

La sélection peut être mono ou multi caractères, précoce ou tardive. La sélection monocaractère est faite sur la base des caractères à hérédité simple comme la précocité, la hauteur de la paille et l'absence de maladies. Elle est généralement précoce, réalisée sur les générations F2, F3, F4. Pour les caractères complexes comme le rendement, la biomasse produite et la capacité de tallage épis, elle est faite tardivement sur les générations F5, F6, F7 qui sont plus ou moins fixées pour les caractères à hérédité simple et qui ont fait l'objet de sélection précoce.

L'efficacité de la sélection est en grande partie dépendante de la variabilité qui existe entre les individus qui composent la population soumise à la sélection. La variabilité est représentée par les différences qui existent entre les individus soumis à la sélection. Elle est d'origine génétique et environnementale (Falconer et Mac Kay, 1996 ; Acquaah, 2007). Plus la part génétique de la variabilité est importante, plus le caractère considéré est sous contrôle génétique additif transmissible à la descendance.

Ainsi les résultats de Mandal et Sarkar (1996), Tarekegne *et al.*, (1996), Fellahi *et al.*, (2013b), Hannachi *et al.*, (2013a) ; Oulmi *et al.*, (2014) et Fellahi *et al.*, (2016) suggèrent la présence d'une importante variabilité phénotype associée à des effets additifs et non additifs pour l'ensemble des variables mesurées sur blé dur et tendre, dont entre autre le rendement et les composantes du rendement et les caractères qui

relèvent de la physiologie de la plante comme le contenu en chlorophylle, la teneur relative en eau et la température de la canopée.

L'efficacité de la sélection est aussi dépendante du degré de détermination génétique ou héritabilité. L'héritabilité mesure la part de la variabilité d'origine génétique qui existe dans la variabilité phénotypique totale (Fellahi, 2017). Elle représente la capacité du sélectionneur à reconnaître les différences entre les individus soumis à la sélection et donc les possibilités d'amélioration du caractère considéré. En effet le succès de la sélection est dépendant de la valeur de l'héritabilité, plus cette valeur est élevée plus le sélectionneur a de l'emprise sur le caractère sélectionné (Fellahi *et al.*, 2013b ; Hannachi *et al.*, 2013b ; Oulmi *et al.*, 2014 ; Salmi *et al.*, 2015 et Fellahi *et al.*, 2016).

L'héritabilité au sens large représente le ratio entre la variance génétique qui est la somme des variances additive, de dominance et épistatique et la variance phénotypique qui est la somme des trois premières citées plus la variance environnementale et la variance d'interaction génotype x environnements.

L'héritabilité au sens large indique dans quelle mesure le phénotype d'un individu est déterminé par son génotype. Par contre l'héritabilité au sens étroit est le ratio entre la variance additive et la variance phénotype. Elle indique dans quelle mesure le phénotype d'un individu est déterminé par les gènes transmis par les parents. C'est une mesure du degré de ressemblance entre apparentés, car elle mesure la part de la variance additive qui est transmise à la descendance ; plus cette part est importante plus le gain génétique attendu de la sélection est élevé (Acquaah, 2007 ; Salmi *et al.*, 2015 ; Fellahi *et al.*, 2016).

En plus de la variabilité phénotypique et du degré de l'héritabilité, l'efficacité de la sélection (notamment multi caractères) dépend aussi des liaisons entre les caractères concernés directement (réponse directe) ou indirectement (réponses

corrélatives) par la sélection. Les liaisons entre caractères sont dues à des liaisons d'ordre génétique parce que les gènes contrôlant les caractères ciblés sont portés par le même chromosome, ou bien les caractères considérés sont liés du point de développement, par exemple la liaison entre le nombre de grains par épi et le poids moyen d'un grain (Simmonds, 1986 ; Bouzerzour *et al.*, 1998).

Dans ce contexte une meilleure connaissance des liaisons qui existent entre les différents caractères mesurés est intéressante et nécessaire pour identifier ceux qui peuvent servir comme critères de sélection et quels sont les effets attendus sur les caractères non concernés par la sélection (Salmi *et al.*, 2015 ; Fellahi *et al.*, 2016). Ainsi, chez l'orge, Jilal (2011) mentionne l'existence de corrélations positives entre le rendement en grains et la biomasse aérienne et entre le pédoncule et l'extrusion ; et négatives entre la date d'épiaison et le rendement et les caractéristiques du pédoncule.

Analysant l'amplitude de la variabilité présente, le degré de détermination génétique et le gain attendu de la sélection des caractères agronomiques chez 18 variétés et lignées en ségrégation de blé dur (*Triticum durum* Desf), Salmi *et al.*, (2015) rapportent la présence d'une variabilité appréciable pour les caractères mesurés. Le degré de détermination génétique prend des valeurs supérieures à 70%, pour la durée de la phase végétative et la hauteur de la plante, des valeurs moyennes, situées entre 50 et 70%, pour la surface de la feuille étendard et le nombre de grains par épi, et des valeurs inférieures à 50% pour le rendement et la biomasse aérienne (Salmi *et al.*, 2015).

Salmi *et al.*, (2015) rapportent aussi que les valeurs du gain attendu en sélection, exprimées en % de la moyenne du caractère, varient de 4.8% pour la durée de la phase végétative à 45.9% pour le rendement grain. La sélection mono caractère identifie 6 génotypes désirables qui apportent un gain de 14.9% pour l'indice de récolte, 3.7 g/1000 grains et 4.8% de teneur relative en eau, une réduction de 18.6% de

dommages cellulaires, 2.1 g de rendement par plante, 2.1 cm de longueur de l'épi et 12.9 grains de plus par épi, et un gain de 1.7 épis associé à 8.8 g de biomasse.

Relativement aux performances du témoin Bousselam, les résultats de Salmi *et al.*, (2015) indiquent que les lignées sélectionnées apportent un gain attendu de rendement appréciable variant de 53.8 à 161.5%. Ce gain attendu est accompagné par des gains positifs, mais variables en valeurs, pour la hauteur, la biomasse, l'indice de récolte, la longueur de l'épi, le nombre d'épis et le nombre de grains par épi. Le gain de rendement est associé à une amélioration de la tolérance au stress thermique, ce qui est désirable, mais aussi à une forte réduction indésirable du poids de 1000 grains, variable de -2.2 à -14.7%.

Selon Abbassenne *et al.*, (1997), l'association entre la hauteur de la plante et le rendement en paille n'est généralement observable qu'en conditions de sécheresse. En conditions favorables, la production de paille est plus liée à la capacité de tallage épis qui est plus élevée chez les génotypes courts. De plus, et selon Nouar *et al.*, (2010), la hauteur varie, selon les environnements, plus chez les lignées hautes que chez les courtes de paille.

Selon Fellahi *et al.*, (2013a) ainsi que Hamli *et al.*, (2015) et Salmi *et al.*, (2015), pour la région des hauts plateaux de l'Est, la hauteur de la végétation, la durée de la phase végétative et la surface de la feuille étandard semblent être proches de celles qui caractérisent le témoin Bousselam. Par contre la biomasse, le rendement, les composantes du rendement, l'indice de récolte, la longueur de l'épi et les caractères indicateurs de la tolérance des stress comme la teneur relative en eau et la stabilité de la membrane plasmique sont, par contre, candidats à l'amélioration.

Les résultats de Fellahi *et al.*, (2013a), Hamli *et al.*, (2015), et Salmi *et al.*, (2015) indiquent qu'il est difficile d'améliorer simultanément les nombres d'épis et des grains par épi et le poids de 1000 grains, sur la base de la sélection d'un caractère à la fois (liaisons négatives ou non significatives), de ce fait ces auteurs préconisent le

recours à la sélection sur indice ou multi-caractères. Utilisant un indice de sélection qui intègre la durée du cycle, la hauteur, la longueur de l'épi, le poids de 1000 grains et la biomasse et le rendement, Kumar *et al.*, (2012) enregistrent un gain de rendement de 27.5%.

Subhashchandra *et al.*, (2009) mentionnent que la longueur de l'épi exerce un effet direct positif et élevé sur le rendement/plante, suivi du nombre de talles fertiles. Ces auteurs proposent que les efforts de la sélection doivent se concentrer sur ces deux caractères pour améliorer indirectement le rendement en grains. El-Morshidy *et al.*, (2010) observent que la sélection de la précocité est accompagnée par une réduction de la hauteur, du poids de 1000 grains et du rendement par plante, alors que la sélection directe du rendement améliore significativement le rendement en grains.

Selon Sanchez-Garcia (2013) l'amélioration du rendement en grains, en Espagne, entre 1930-2000, a eu lieu au cours de deux périodes : à partir de 1950 et à partir de 1970. La première période coïncide avec l'adoption des premières générations de variétés améliorées, et la seconde débute avec l'introduction du matériel qui dérive du germoplasme de Cimmyt. L'amélioration du rendement au cours de la première période vient surtout de celle du nombre de grains par épi.

Le gain obtenu au cours de la seconde période vient surtout du raccourcissement du cycle et de la hauteur de la paille, suite à l'introduction des gènes de nanisme. Ces gènes ont des effets pléiotropiques sur l'indice foliaire (LAI) et la sénescence foliaire (LAD) qui a été améliorés chez les génotypes nouveaux, qui produisent plus de biomasse aérienne et font une meilleure répartition de la matière sèche accumulée entre le grain et la paille (Sanchez-Garcia, 2013).

L'efficacité de la sélection est aussi dépendante de la génération sélectionnée (précoce ou tardive). L'intérêt de la sélection précoce est surtout d'ordre pratique et financier. En effet si toutes les plantes ou individus indésirables sont éliminés tôt au

cours du processus de sélection, ceci réduit les efforts et les moyens nécessaires pour réaliser les essais comparatifs d'évaluation et de testage du matériel végétal sous sélection.

Ces tests seront, dans ce cas, limités aux seules lignées ou individus désirables restants (Simmonds, 1986). Ainsi selon Allard et Bradshaw (1964), dans le cas où 50% ou plus du matériel végétal soumis à la sélection est éliminé, sur la seule base d'un seul caractère, l'efficacité de la sélection serait nettement améliorée.

En effet, le plutôt possible le génotype désirable est identifié, il y a moins de risque de le perdre plus tard. Suite au nombre élevé de sujets à traiter en sélection précoce, il est nécessaire, et par précaution pour ne pas réduire la variabilité pour les caractères désirables, d'éliminer seulement les individus réellement indésirables, qui ne seront plus évalués au cours des générations descendantes.

Dans la pratique ceci est rarement possible, car on travaille sur du matériel (F2, F3) qui n'a pas encore complètement exprimé sa variabilité phénotypique due à la ségrégation. Dans ce contexte Allard (1960) ainsi que Martin and Gerald (2002) suggèrent que la sélection précoce doit se faire uniquement pour les caractères hautement héréditaires, comme la résistance aux maladies et/ou la hauteur de la végétation, et la sélection tardive doit se faire sur du matériel qui a passé ce test.

En effet les variances additive et non additives des caractères polygéniques, comme le rendement, les composantes du rendement et la biomasse sont variables chez les individus des premières populations ségrégantées ce qui rend l'identification des individus désirables pratiquement difficile (Allard, 1960; Martin and Futi, 2000).

La sélection n'est effective et aisée que lorsque le degré d'homozygotie du matériel végétal de la génération sous sélection est assez élevé, avec une moindre présence des effets de dominance, comme c'est, généralement, le cas chez les

générations au-delà de la F5 voire F6. En effet en théorie et pour un seul caractère, l'homozygotie totale n'est atteinte que vers la F7 voire F8 (Tableau 1, Figures 1 et 2).

L'efficacité de la sélection précoce ou retardée mono ou multi caractères est aussi influencée par la présence de l'interaction génotype x environnements. Plus l'interaction est importante en valeur plus le degré d'héritabilité du caractère considéré est faible.

Selon Haddad (2016) la variation des caractères, d'une année à l'autre et d'un lieu à l'autre, a pour origine la sensibilité du matériel végétal à l'effet combiné des stress abiotiques. Cette variation rend moins aisée l'identification des individus réellement désirables, suite à la faible liaison entre les valeurs prises par le caractère ciblé d'une génération à l'autre ou d'un environnement à l'autre (Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Mühleisen, 2015 ; Haddad *et al.*, 2016).

Tableau 1. Variation du degré d'homozygotie d'un seul locus au cours des premières générations en ségrégations (Acquaah, 2007).

Parents	AA	Aa
Génération	Hétérozygotie	Homozygotie
F1	100.00%	0.00%
F2	50.00%	50.00%
F3	25.00%	75.00%
F4	12.50%	87.50%
F5	6.25%	93.75%
F6	3.13%	96.88%
F7	1.56%	98.44%
F8	0.78%	99.22%

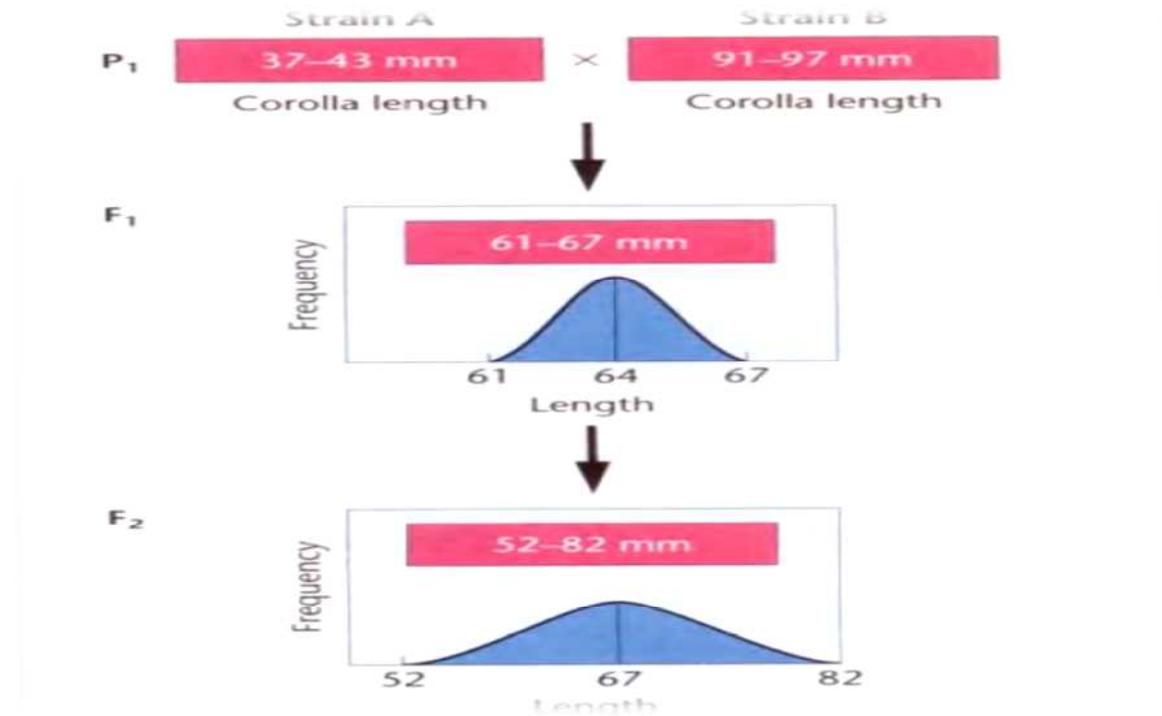


Figure 1. Variabilité phénotypique en F₁ et en F₂ (Acquaah, 2007)

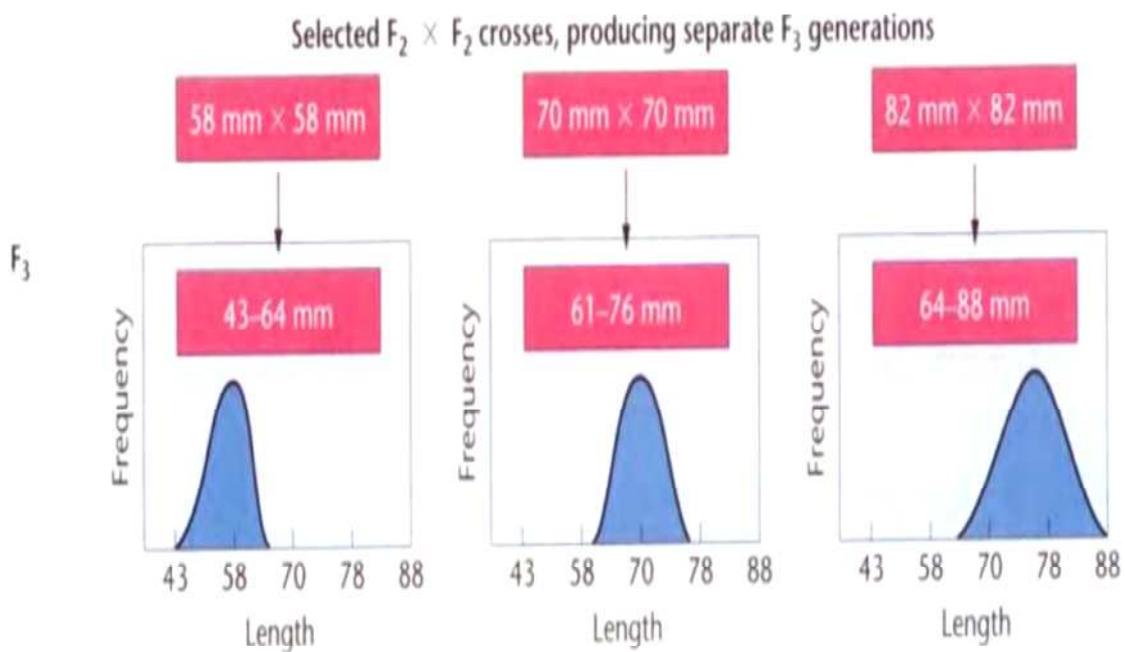


Figure 2. Variabilité phénotypique en F₃ (Acquaah, 2007)

Les caractères ciblés par la sélection doivent donc avoir en plus d'une héritabilité élevée, un degré de liaison inter générations ou environnements assez élevé. Ils doivent être facilement mesurables et significativement liés au caractère d'intérêt qui est le rendement en grains. En effet, selon Reynolds *et al.*, (2001) ainsi que Jackson (2001), un bon critère de sélection doit présenter les caractéristiques suivantes :

- (1) une héritabilité plus élevée que celle du rendement en grains,
- (2) une corrélation génétique significative et élevée avec le rendement en grains
- (3) doit être à même d'identifier, de manière efficace et rapide, les génotypes à haut potentiel de rendement parmi les lignées en ségrégations soumises à la sélection.

Ceci nécessite de connaître les coefficients de corrélation génétique, l'héritabilité et le gain génétique attendu de la sélection, comme le suggèrent Salmi *et al.*, (2015) ainsi que Fellahi *et al.*, (2016).

Plusieurs auteurs rapportent que le progrès fait en matière de rendement vient essentiellement de l'amélioration de la répartition de la matière sèche aérienne accumulée entre la paille et le grain, mesuré par l'indice de récolte. (Calderini *et al.*, 1995 ; Sayre *et al.*, 1997). L'indice de récolte a atteint un maximum de 60%, selon Reynolds *et al.*, (1999), ce qui fait que toute amélioration du rendement en grains doit se faire par le biais de l'amélioration de la biomasse aérienne et en maintenant l'indice de récolte à son maximum (Bouzerzour *et al.*, 1998).

La capacité de la plante à terminer son cycle végétatif avant que le déficit hydrique n'affecte sérieusement son développement, a été largement utilisée comme moyen pour minimiser les effets de la sécheresse (Berger *et al.*, 2006, Mekhlouf *et al.*, 2006). La sélection pour la tolérance à la sécheresse est pratiquée sur la base du

rendement grain sous conditions de stress hydrique (Reynolds *et al.*, 2007). Le progrès génétique a été faible, suite à la variabilité spatiotemporelle de la sécheresse, d'une année à l'autre et d'un site à l'autre (Bahlouli *et al.*, 2005 ; Haddad, 2016).

Dans ce contexte Haddad *et al.*, (2016) suggèrent d'évaluer le matériel végétal sous sélection dans plusieurs milieux (années, dates de semis, fertilisation N, désherbage, localités) en comparaison avec les meilleurs témoins du moment et dans l'environnement ciblé où les futures variétés seront adoptées. Quoique coûteuse, une telle évaluation est nécessaire pour identifier effectivement les meilleurs génotypes.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

1. MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION

L'expérimentation a été conduite sur le site expérimental de la Station de Recherche Agricole l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, (SRA-ITGC, Sétif, 36°12' N, 5°24' E, 1023 m d'altitude) au cours des campagnes agricoles 2009/10 et 2010/2011. Les terres de ce site sont caractérisées par un relief plat, de pente inférieure à 2 % et sont majoritairement carbonatés. Les carbonates de calcium sont présents en surface sous forme d'individualisations calcaires souvent continues, formant des dalles (Kribaa, 2001).

La texture du sol est argileuse à limono argileuse. Le taux de calcaire total est de 31.3% et celui de la matière organique est de 1.87%. La densité apparente est de 1.35 (Chennafi *et al.*, 2006). La capacité au champ du sol est de 2.5 mm/cm, le point de flétrissement se situe à 1.2 mm/cm, d'où une réserve utile de 1.3 mm/cm (Kribaa, 2001). Le climat de la région est caractérisé par des hivers froids, de fréquentes gelées et des coups de sirocco (Vent saharien très chaud et très sec, soufflant sur l'Afrique du Nord et le Sud de la mer méditerranée) précoces (Chennafi *et al.*, 2006). La température moyenne durant les mois de l'hiver est de 6°C et celle des mois d'été est de 24.4°C (Annicchiarico *et al.*, 2002).

L'expérimentation porte sur le suivi de deux générations F3 et F4 provenant de trois croisements réalisés entre la variété Ofanto, prise comme parent constant, et les variétés Mohammed Ben Bachir, Waha et Mrb₅, prises comme parents variables. Les lignées des différentes générations, une par campagne agricole, sont mises en place, généralement entre la fin du mois de novembre et le début du mois de décembre, sur deux (2) rangs de 5 m de long par lignée. Les parents, Ofanto, MBB, Waha et Mrb₅ ainsi que le témoin de référence Boussalem, sont semés sur des rangs de mêmes dimensions, et répétés quatre fois. La densité de semis est de 200 graines/m². Les lignées parentales représentent un matériel adapté à la région de Sétif. Ce matériel a été

sélectionné sur ce même site expérimental. Mrb5 est une lignée issue du croisement entre JoriC69 et Haurani (JoriC69/Hau). Ofanto est une variété italienne provenant du croisement entre les variétés Appulo et Valnova (Devita *et al.*, 2007). Waha est une sélection de l'ITGC de Sétif, elle est issue du croisement entre Pelicano, Ruffino et Gaviota, (Plc/Ruff//Gta's') (Laala, 2009). Mohammed Ben Bachir est une sélection généalogique faite à l'intérieur d'une population locale de blé dur de la région de Ain Roua, du nord de Sétif (Laumont et Erroux, 1961).

Les techniques culturales appliquées sont celles pratiquées par la station de l'ITGC de Sétif et décrites par Chennafi *et al.*, (2011). Le précédent cultural est une jachère travaillée. Au stade tallage, l'engrais azoté est apporté à raison de 100 kg ha⁻¹ de produit commercial sous la forme d'urée à 46%. Le désherbage chimique est effectué au mois de mars, juste avant l'apport de l'engrais azoté, avec le Grandstar 75 WG [*Methyl tribenuron*] à raison de 12 g ha⁻¹.

2. VARIABLES MESUREES

Les mesures ont porté sur les variables suivantes :

- ✓ La durée de la phase végétative (DPV) est déterminée en jours calendaires, du 1^{er} janvier à la date de réalisation de 50% d'épiaison, par lignée.
- ✓ La hauteur de la plante (HT), en cm, est prise à maturité, du niveau du sol au sommet de la strate moyenne des épis, barbes non incluses.
- ✓ La biomasse aérienne (BIO) est mesurée, à maturité, à partir d'un bottillon de végétation récolté d'un rang de 1 m de long.
- ✓ Le nombre d'épis (NE) et le poids des épis (PE) sont déterminés à partir du même bottillon servant à la détermination de la biomasse aérienne.
- ✓ Le rendement en grains (RDT) est déterminé après battage à la batteuse à gerbe des épis provenant du bottillon de végétation.

✓ Le poids de 1000 grains (PMG) est déduit par comptage et pesage de 200 graines par lignée.

✓ Le nombre de grains par épi (NGE) et par m² (NGM²) sont déterminés par calcul :

$$\text{NGM}^2 = 1000(\text{RDT}/\text{PMG})$$

et

$$\text{NGE} = \text{NGM}^2/\text{NE}.$$

✓ Le rendement économique a été estimé comme suit :

$$\text{RDT}_{\text{ec}} = \text{RDT}_{\text{grain}} + 0.3\text{RDT}_{\text{PLL}}, \text{ selon Annicchiarico } et \text{ al.}, (2005).$$

✓ Le rendement en paille (PLL) est estimé par la différence entre la biomasse et le rendement grain.

✓ L'indice de récolte (HI) est estimé par le rapport du rendement en grains sur la biomasse aérienne.

3. ANALYSE DES DONNEES

Les variables mesurées sont traitées par la statistique descriptive, pour obtenir les moyennes, les valeurs extrêmes, les variances et les fréquences. Les relations entre variables mesurées sont étudiées par l'analyse des coefficients de corrélations phénotypiques. Les variables déterminant le rendement en grains et la biomasse aérienne sont déduites par régression progressive et l'analyse du Path (Fellahi *et al.*, 2013a). Le degré de ressemblance entre générations est déterminé par le coefficient de corrélation de rang de Spearman (RS), pour les différentes variables mesurées.

Les coefficients de variations phénotypiques (CV_p), génotypiques (CV_g) et résiduels (CV_e) ont été déterminés par les formules proposées par Acquaaah (2007) :

$$\checkmark \quad CVp(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sigma^2 p}}{Ybar}$$

$$\checkmark \quad CVg(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sigma^2 g}}{Ybar}$$

$$\checkmark \quad CVe(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sigma^2 e}}{Ybar}$$

L'héritabilité au sens large (h^2_{bs}) et au sens étroit sont déterminées comme suit selon Acquaah (2007) :

$$h^2_{bs} = \frac{\sigma^2 G}{\sigma^2 P}$$

Avec $\sigma^2 G$ = Variance génotypique ; $\sigma^2 P$ = Variance phénotypique

Le coefficient de l'héritabilité au sens étroit (h^2_{ns}) a été déterminé comme le coefficient de la régression -de la descendance sur la génération -parentale :

$$h^2_{ns} = \text{régression } F_n/F_{n-1} \quad (\text{Cox et Frey, 1984})$$

Le degré d'association des caractères mesurés est déterminé suite au calcul des coefficients de corrélations phénotypiques. Les coefficients de corrélations sont déterminés par la formule suivante : $r(xy) = \text{cov}(xy) / \sqrt{\sigma^2 x \times \sigma^2 y}$, où $r(xy)$ = coefficient de corrélation, $\text{cov}(xy)$ = covariance des xy , $\sigma^2 x$ = variance des valeurs prises par la variable x et $\sigma^2 y$ = variance prise par la variable y .

Les analyses statistiques ont été faites avec les logiciels Cropstat 7.2 (2009), Past (Hammer *et al.*, 2001), et Lazstats (2013). Le calcul de la plus petite différence significative ($P_{pds5\%}$) est fait à partir de la résiduelle de l'analyse de la variance des variables mesurées chez les lignées parentales qui sont répétées.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. CONDITIONS CLIMATIQUES DES ANNEES D'ETUDES

1.1. PLUVIOMETRIE

Le cumul des pluies enregistrées au cours des mois, allant de septembre à juin inclus, est de 502.4 mm pour la campagne 2009/10. La campagne 2010/11 avait accumulé la quantités de 404.5 mm, (Figure 3).

Les écarts intercampagnes varient fortement d'un minimum de 97.9 mm à un maximum de 150.3 mm. Ces résultats indiquent la grande variabilité des cumuls pluviométriques à laquelle est sujet le climat des hautes plaines orientales dont le site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif en fait parti.

La variabilité est aussi présente entre les différents mois de la campagne agricole et entre les différentes saisons. Ainsi en 2009, les mois les plus pluvieux sont janvier 2009 et avril 2009, et les moins pluvieux sont mai 2009. Par contre en 2009/10, les mois de janvier 2010 à mai 2010 sont les pluvieux, et ceux d'octobre 2009, novembre 2009 et décembre 2009 sont les moins pluvieux.

Pendant la campagne agricole 2010/11 les mois de septembre 2010, janvier 2011 et mai 2011 sont les plus secs, alors que les mois les plus pluvieux sont ceux de février 2011 et avril 2011. (Figure 3). Cette variabilité des quantités de pluies enregistrées par mois explique le peu de ressemblance entre campagnes et donc la variabilité des performances de rendement en grains des variétés cultivées. On note aussi de la variabilité entre saisons.

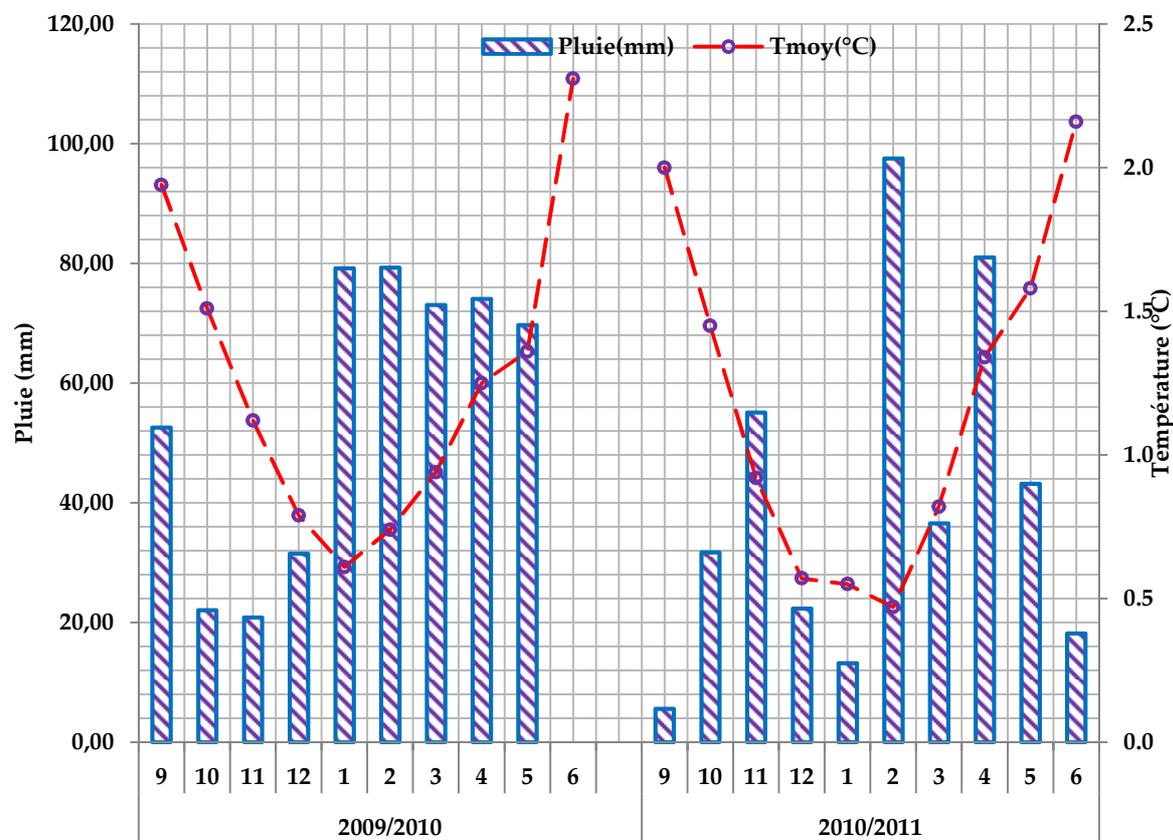


Figure 3. Pluviométrie et température moyenne mensuelles enregistrées au cours des campagnes d'études sur le site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif.

D'une manière générale, on note qu'au cours de ces deux campagnes agricoles, les quantités de pluies enregistrées en automne (septembre, octobre et novembre, avec une moyenne de 98.6 mm), sont plus faibles que celles enregistrées au cours de l'hiver (décembre à février, moyenne de 152.3 mm) et au printemps (mars à juin, avec une moyenne de 156.3 mm) (Figure 4).

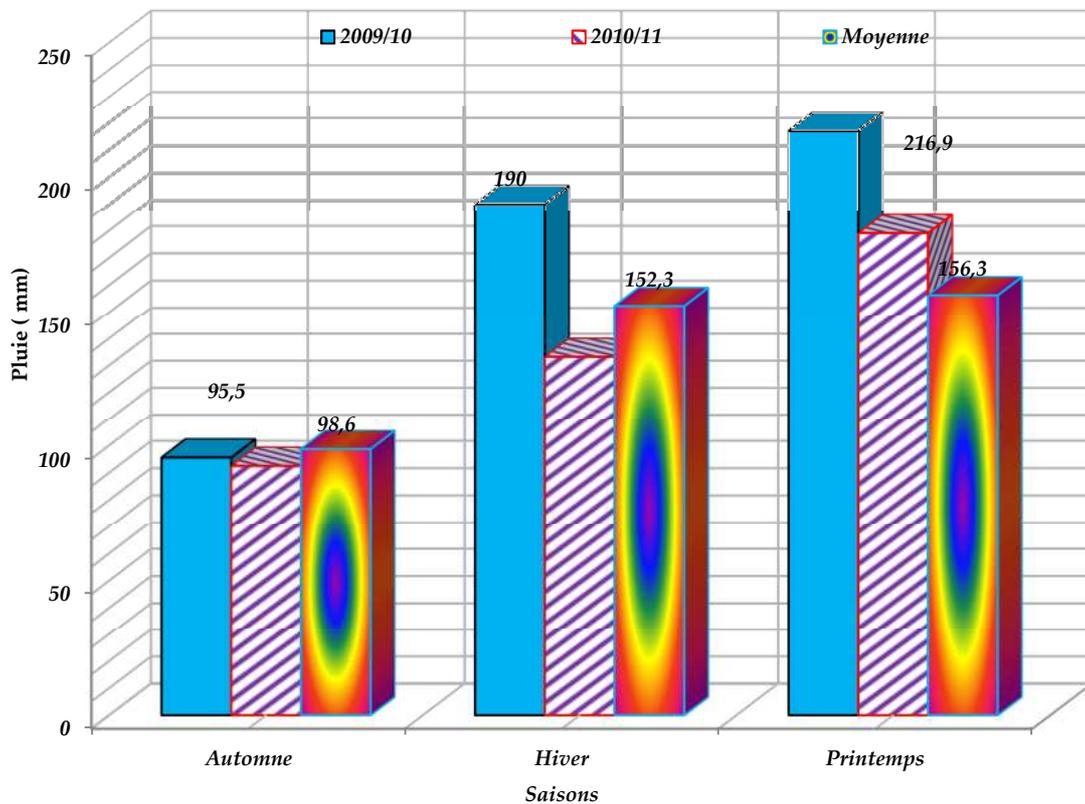


Figure 4. Pluviométries et températures moyennes saisonnières du site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif enregistrées au cours des campagnes agricoles d'études.

Cependant la variation des quantités de pluies enregistrées par saison est aussi forte intra et inter campagnes. Elle est plus forte au cours de la saison du printemps. En effet au cours des deux campagnes agricoles, la pluie printanière est de 216.9 mm en 2010/11, soit pratiquement du simple au double (Figure 4).

1.2. TEMPERATURE MOYENNE

La température moyenne est très élevée en été, puis baisse progressivement au cours de l'automne pour atteindre les basses valeurs en hiver notamment au cours des mois de janvier et février. Elle se redresse rapidement au cours du printemps, accélérant la croissance de la végétation pour atteindre des valeurs élevées en été (Figure 3). En effet par saison les moyennes de la température

moyenne automnale et printanière ne sont pas très différentes (15.5°C en automne contre 15.8°C au printemps). Par contre la moyenne hivernale est trop basse atteignant 5.7°C ce qui limite de la croissance de la plante, réduisant la valorisation de l'humidité du sol qui est, le plus souvent, plus implorante au cours de cette saison (Figures 3 et 5).

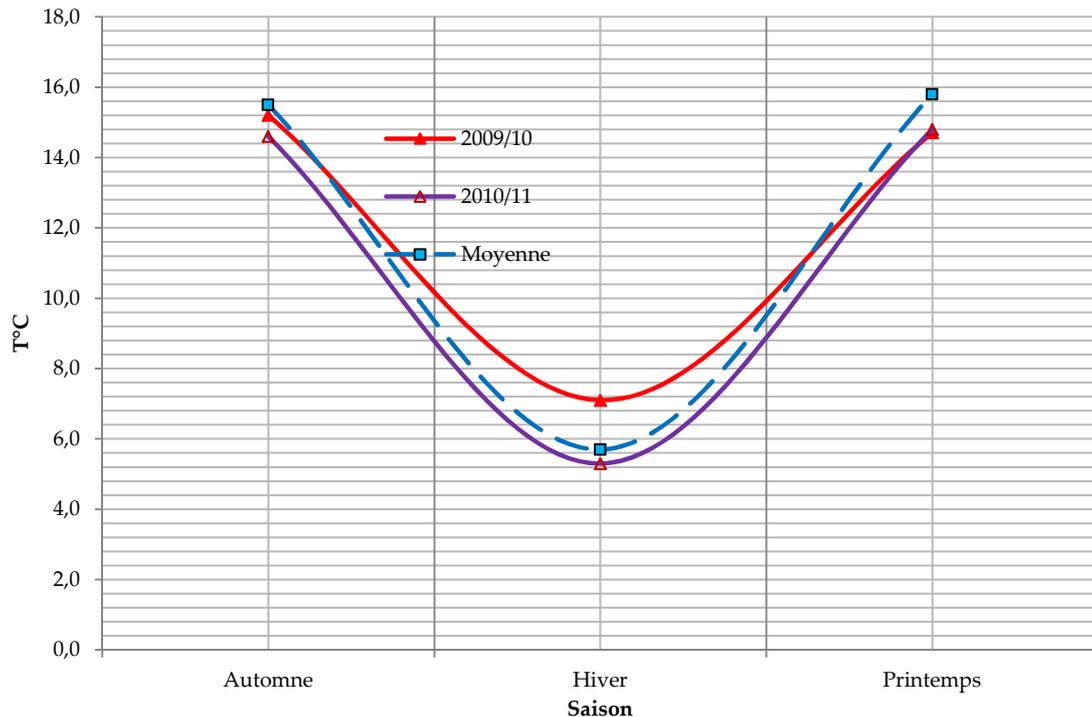


Figure 5. Cycle bimodale de la variation des moyennes de la température moyenne saisonnière du site expérimental de la SRA-ITGC de Sétif enregistrées au cours des campagnes agricoles d'études.

Au cours de deux campagnes agricoles, la moyenne de la température moyenne automnale est de 14.6°C (2010/11). Par contre la moyenne hivernale est de 7.4°C (2009/10). La température printanière est de 14.7°C (2009/10). La température moyenne suit un mode bimodale comme indiqué en figure 5, basse en hiver, intermédiaire en automne et au printemps et élevée en été.

2. VARIABILITE ET HERITABILITE DES CARACTERES DES GENERATIONS F3 ET F4

2.1. BIOMASSE, PAILLE ET POIDS DES EPIS

2.1.1. GENERATION F3

Parmi les objectifs de cette étude figure celui de tester la présence et d'analyser la variabilité créée par croisement chez les générations précoces F3 et F4. Ainsi pour la biomasse, la paille produite à maturité et le poids des épis, les valeurs moyennes de la génération F3 de ces trois caractères varient largement d'un minimum de 202.0 g/m², 108.0 g/m² et 102.0 g/m², à des maximas de 860.0 g/m², 608.9 g/m², et 426.0 g/m² ; autour des moyennes de 398.6 g/m², 265.4 g/m², et 210.4 g/m², respectivement pour ces trois variables dans l'ordre cité ci-dessus (Tableau 2, Figure 6).

Les différences entre les moyennes extrêmes et entre ces valeurs caractéristiques et les moyennes générales de la population sont largement significatives en comparaison avec les valeurs prises par la plus petite différence significative de ces trois variables, qui sont de 38.9 g/m², 39.4 g/m² et 17.1 g/m², respectivement, pour la biomasse, la paille et le poids des épis (Tableau 2).

On note l'existence de lignées candidates à la sélection aussi bien dans le sens de l'augmentation des valeurs des caractères d'intérêts que dans le sens de la réduction des valeurs Cette variabilité suggère que la sélection de la fraction des sujets situés à droite de la moyenne générale de la génération F3, y compris la valeur maximale, induit un gain génétique significatif puisque cette sélection porte sur des individus qui sont plus performants phénotypiquement (et donc génétiquement) que le reste de la génération F3 (Figure 6).

Cette hypothèse est supportée par les valeurs des coefficients de variations phénotypiques (CVp) et génotypiques (CVg) qui sont largement supérieures au seuil de 20%, prenant des valeurs respectivement de 30.9 %, 34.8% et 30.2% pour le

CVp de la biomasse, de la paille produite et du poids des épis ; et de 27.6%, 27.8% et 27.9% pour le CVg de ces trois variables (Tableau 2).

Tableau 2. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, hérédités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la biomasse aérienne, de la paille produite et du poids des épis de la génération F3 (n=330).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h^2_{bs}	CVp	CVg	Ppds
BIO (g/m ²)	398.6	202.0	860.0	3030.4	12131.3	80.0	30.9	27.6	38.9
PLL (g/m ²)	265.4	108.0	608.9	3104.7	5441.4	63.7	34.8	27.8	39.4
PE (g/m ²)	210.4	102.0	426.0	587.8	3442.0	85.4	30.2	27.9	17.1

PE= poids des épis par m², BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite

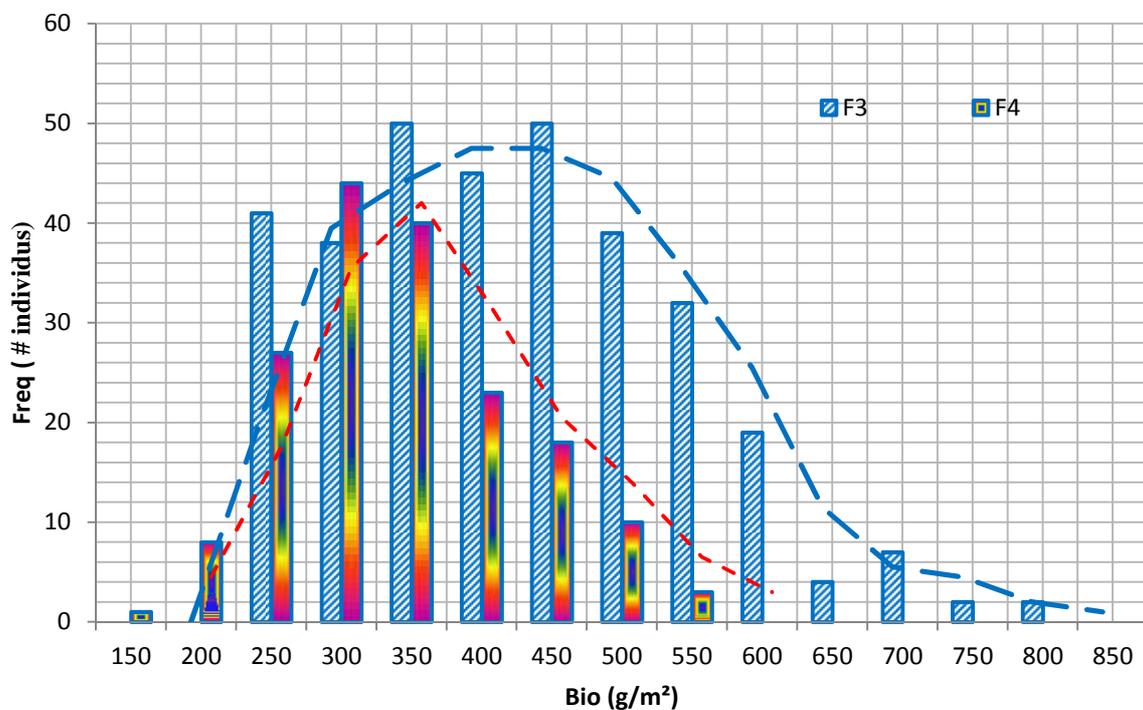


Figure 6. Variabilité phénotypique de la biomasse aérienne des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

Les sélectionneurs utilisent les croisements artificiels pour créer de la variabilité pour les besoins de la sélection. La variabilité est donc nécessaire pour continuer à faire des progrès en matière de rendement et d'adaptation. La variabilité est d'origine naturelle et elle peut aussi être induite artificiellement par suite à des croisements spécifiques et interspécifiques, avec pour objectif

d'assembler, dans une population créée artificiellement, les qualités des parents croisés (Bouzerzour et Benmahammed, 1994).

Le sélectionneur puise dans cette fraction pour créer de la variabilité et de nouvelles variétés plus performantes et mieux adaptées (Ceccarelli *et al.*, 2010). La variabilité observée s'explique par la diversité des parents utilisés en croisement et mérite d'être exploitée à des fins de sélection pour améliorer les trois caractéristiques analysées pour le développement de variétés de blé dur adaptées à la variation des milieux de production en régions semi-arides. En effet dans la zone de production ciblée par cette étude, la paille trouve une forte utilisation aussi bien comme aliment du bétail que comme litière.

Comme en milieux semi-aride, la production de paille est aussi importante que celle du grain, à rendement en grains égale, les variétés qui produisent plus de paille sont mieux appréciées et vite adoptées, que celles qui en produisent moins. Quoiqu'une production élevée de paille ne soit pas forcément liée à une paille haute. Cette dernière est désirable parce que sous stress hydrique elle est le siège de transfert des assimilats stockés pour le remplissage du grain (Belkherchouche *et al.*, 2015).

Au même titre que la paille produite, une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides, elle est la cause principale des rendements élevés enregistrés chez les variétés récentes (Bouzerzour *et al.*, 1998). La production de la biomasse arienne est dépendante de plusieurs facteurs dont le nombre de feuilles produites, la capacité de tallage herbacées et celle de faire monter le plus d'épis par unité de surface emblavée. Elle est aussi sous certaines conditions, dépendante de la hauteur de la plante (Bouzerzour *et al.*, 1998).

Moragues *et al.*, (2006) rapportent que les variétés locales du nord et du sud de la méditerranée divergent pour la biomasse aérienne et sa répartition. Les

variétés du nord produisent plus de talles herbacées, conduisant à une biomasse aérienne et un indice foliaire élevés au stade épiaison. Les variétés du sud, mieux adaptées aux environnements secs, investissent plus de biomasse dans le maitre-brin. Ceci conduit à une meilleure contribution des réserves produites au cours de la pré-anthèse, au rendement.

La contribution des réserves de la tige au rendement est évaluée entre 40 et 90% chez les génotypes du nord et du sud (Moragues *et al.*, 2006). Les résultats obtenus par Benmahammed *et al.* (2004) indiquent, par contre que la biomasse accumulée, le poids de la matière sèche des épis/m², mesurés au stade épiaison, ne sont d'aucune utilité dans la prévision du rendement en grains, parce que ces caractères ne sont pas liés significativement avec ce dernier.

Le degré de détermination génétique au sens large, des deux variables en question, prend les valeurs de 80.0%, 63.7%, et 85.4%, respectivement pour la biomasse, la paille produite et le poids des épis (Tableau 2). Ces valeurs, calculées sur la base d'une seule génération, dont l'effet est confondu avec l'effet année, sont assez élevées, notamment pour la biomasse et le poids des épis, suggérant un contrôle génétique relativement simple et une sélection précoce, en F3, efficace.

2.1.2. GENERATION F4

Quoique relativement plus faible que celles de la génération F3, les valeurs caractéristiques de la génération F4 de la biomasse, de la paille produite à maturité et du poids des épis, prennent des valeurs qui varient aussi largement des minimas de 159.7 g/m², 97.0 g/m² et 80.0 g/m², à des maximas de 521.7 g/m², 328.7 g/m², et 297.3 g/m² ; autour des moyennes de la génération F4 de 319.0 g/m², 203.3 g/m², et 170.3 g/m², respectivement pour ces trois variables (Tableau 3, Figure 4). Les valeurs minimales et maximales du poids des épis sont de 80.0 g/m² et 297.3 g/ m², respectivement, avec une moyenne générale de 170.3 g/m².

Les différences entre les moyennes caractéristiques de cette génération sont significatives en comparaison avec les valeurs prises par la plus petite différence significative qui sont de l'ordre de 92.6 g/m², 51.5 g/m² et 46.6 g/m² pour ces trois variables (Tableau 3). Les coefficients de variation phénotypiques sont supérieurs au seuil de 20%, alors que les coefficients de variations génotypiques sont inférieurs à ce seuil. De ce fait, ils sont justes moyens, comparativement aux valeurs observées pour la génération F3 (Tableaux 2 et 3).

Tableau 3. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la biomasse aérienne, de la paille produite et du poids des épis de la génération F4 (n=174).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h ² bs	CVp	CVg	Ppds
BIO (g/m ²)	319.0	159.7	521.7	2417.3	3799.5	61.1	24.7	15.4	92.6
PLL (g/m ²)	203.3	97.0	328.7	747.7	1975.3	72.5	25.7	13.4	51.5
PE (g/m ²)	170.3	80.0	297.3	613.4	1451.2	70.3	26.7	14.5	46.6

PE= poids des épis par m², BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite

Comparativement à la génération F3, les moyennes de la biomasse, de la paille et du poids des épis de la génération F4, sont réduites de 20.0%, 23.4% et 19.1%, respectivement. Les valeurs minimales sont réduites de 20.9%, 10.2% et 21.6%, alors que les valeurs maximales sont réduites de 39.3%, 46.0% et 30.2%, respectivement pour la biomasse, la paille et le poids des épis. La réduction de la variabilité de la biomasse, de la paille, et du poids des épis, en F4, comparativement à ce qu'elle était en F3 (Figures 7 et 8), s'explique plus par l'effet année qui est confondu avec celui de la génération, que par la réduction de la taille de la population F4 suite à l'élimination des individus peu désirables (Maladies, hauteur excessive, nanisme, tardiveté, égrenage).

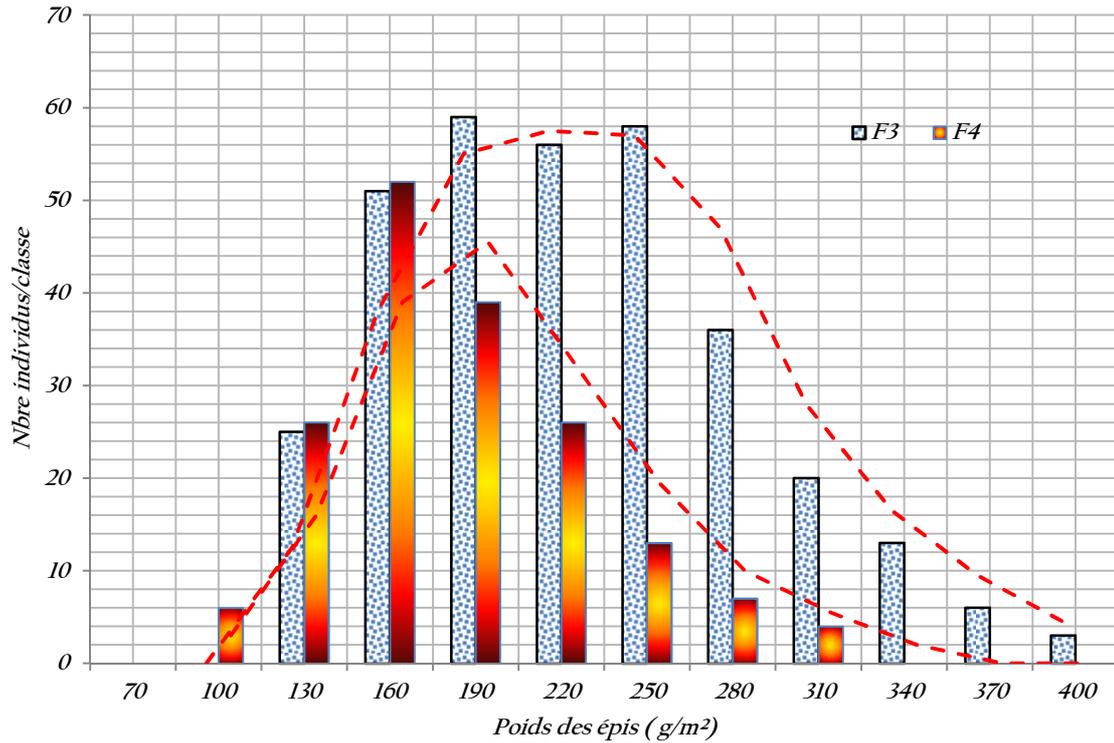


Figure 7. Variabilité phénotypique du poids des épis des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$).

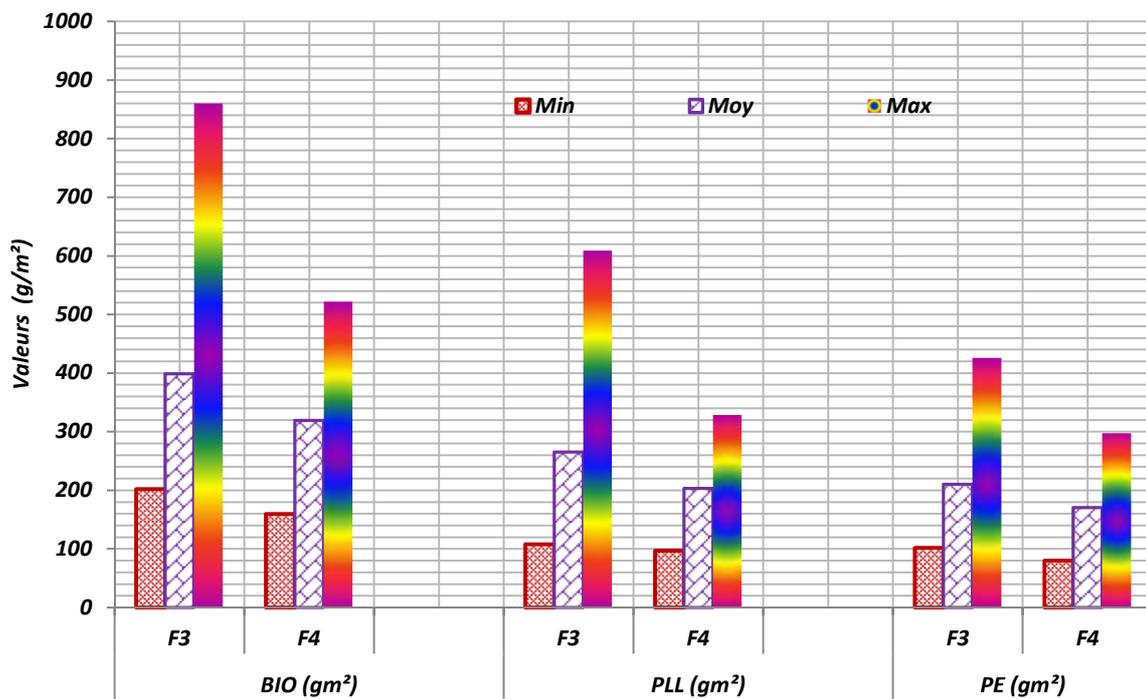


Figure 8. Valeurs moyennes caractéristiques de la biomasse, de la paille produite et du poids des épis des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$).

L'élimination des individus off-type ne toucherait, en principe, que les individus situés à gauche de la moyenne de la génération et de ce fait, malgré qu'il y a réduction de la variabilité, les individus les plus intéressants pour la sélection sont maintenus dans la population descendante. Ceci n'est valable qu'en cas d'absence d'interaction génotype x années. Par contre si la réduction de la variabilité est due à l'effet année, il y a risque de changement d'ordre ou de classement des individus pour les variables analysées, d'une génération à l'autre, ce qui suggère la présence de l'interaction génotype x environnements et donc du peu de ressemblance entre apparentés. Dans ce dernier cas, le même individu se comporte comme deux individus différents au cours des deux générations ou des deux années successives. Ceci complique le processus de sélection qui doit se faire sur plusieurs années, environnement et localités (Haddad *et al.*, 2016).

Le degré de détermination génétique au sens large, des trois variables, prend les valeurs de 61.1%, 72.5%, et 70.3%, respectivement, pour la biomasse, la paille produite et le poids des épis (Tableau 3). Ces valeurs sont justes moyennes, indiquant un contrôle génétique simple pour ces trois variables en F4. Pour la biomasse aérienne et le poids des épis, les valeurs de la F4 sont plus faibles que celles observées en F3, alors que c'est l'inverse qui est noté pour la paille produite. Ces différences suggèrent un effet environnement ou milieu variable selon le caractère mesuré et la génération étudiée. Elles suggèrent aussi qu'il y a une meilleure contribution du génotype à l'expression du phénotype pour la biomasse et le poids des épis en F3 qu'en F4, et une moindre contribution pour la paille produite.

2.2. HAUTEUR ET DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE

2.2.1. GENERATION F3

Les valeurs moyennes caractéristiques des générations F3 et F4 de la hauteur de la plante et de la durée de la phase végétative sont données aux tableaux 4 et 5 et les figures 7 et 8. Pour la hauteur de la plante, ces valeurs varient d'un minimum de 56.0 cm à un maximum de 133.0 cm, avec une moyenne générale de la population F3 de 90.1 cm (Tableau 4).

Tableau 4. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la hauteur de la plante et de la durée de la phase végétative de la génération F3.

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h^2_{bs}	CVp	CVg	Ppds
PHT (cm)	90.1	56.0	133.0	13.9	304.2	95.6	19.8	19.4	2.6
DPV (j)	130.3	128.0	135.0	0.3	1.7	86.8	1.1	1.0	0.36

PHT= Hauteur de la végétation, DPV= durée de la phase végétative

Les différences entre ces valeurs sont significatives vu que la plus petite différence significative est de 2.6 cm. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont assez voisins et proches de 20%, suggérant une importante variabilité pour ce caractère (Tableau 4). Pour la durée de la phase végétative, ces valeurs varient d'un minimum de 128.0 j à un maximum de 135.0 j, avec une moyenne générale de la population F3 de 130.3 j (Tableau 4). La plus petite différence significative est de l'ordre de 0.36 j, suggérant une meilleure précision de mesure de cette variable (Tableau 4).

L'amplitude de 7 jours suggère les possibilités de soustraire une partie du cycle de la plante aux stress de fin de cycle de la culture. Quoique les coefficients de variation de cette variable sont de faibles valeurs, de l'ordre de 1%, suggérant, au contraire, peu de variabilité au sein de la génération F3 analysée. Le degré de détermination génétique de cette caractéristique ainsi que celui de la hauteur de la plante sont assez élevés, prenant des valeurs de 86.8% et 95.6% et suggérant un contrôle génétique moins complexe, dû à des gènes à effets majeurs.

2.2.2. GENERATION F4

La distribution des valeurs de la hauteur de la végétation de la génération F4 est plus rétrécie que celle de la génération F3 (Figure 9), prenant des valeurs moyennes de 64.0, 93.8 et 127.5 cm pour le minimum, la moyenne et le maximum observés (Tableau 5). Le coefficient de variation phénotypique est de 15.5%, juste moyenne alors que le coefficient de variation génotypique est très faible et de valeur de 2.2% (Tableau 5). La faible valeur du coefficient de variation génotypique suggère un effet milieu intense sur l'expression de la hauteur de la végétation qu'un effet génotypique. Le degré de l'héritabilité au sens large est de 98.0% (Tableau 5).

Tableau 5. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) de la hauteur de la plante et de la durée de la phase végétative de la génération F4 (n=174).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h^2_{bs}	CVp	CVg	Ppds
PHT (cm)	93.8	64.0	127.5	4.2	208.4	98.0	15.5	2.2	3.9
DPV (j)	115.1	110.0	122.0	0.6	7.5	92.9	2.5	0.7	1.4

PHT= Hauteur de la végétation, DPV= durée de la phase végétative

La distribution des valeurs prises par la durée de la phase végétative de la génération F4 présente une amplitude similaire à celle de la génération F3, indiquant que la réduction du nombre de sujets en F4, ne semble pas affectée la variabilité pour la durée de la phase végétative, comme pour la biomasse aérienne, la paille produite et le poids des épis (Tableau 5, Figure 10).

Les valeurs caractéristiques de la durée de la phase végétative varient de 110.0 jours pour le minimum à 122.0 jours pour le maximum avec une moyenne de 115.1 jours. Les coefficients de variations phénotypique et génotype sont très faibles, prenant des valeurs de 2.5 et 0.7%, respectivement, alors que le degré de détermination génétique est assez élevé, de l'ordre de 92.9% (Tableau 5). La génération F4 accuse un changement significatif de la position de la moyenne de la

durée de la phase végétative suggérant un raccourcissement de la durée de cette phase comparativement à celui de la génération F3 (Figure 10).

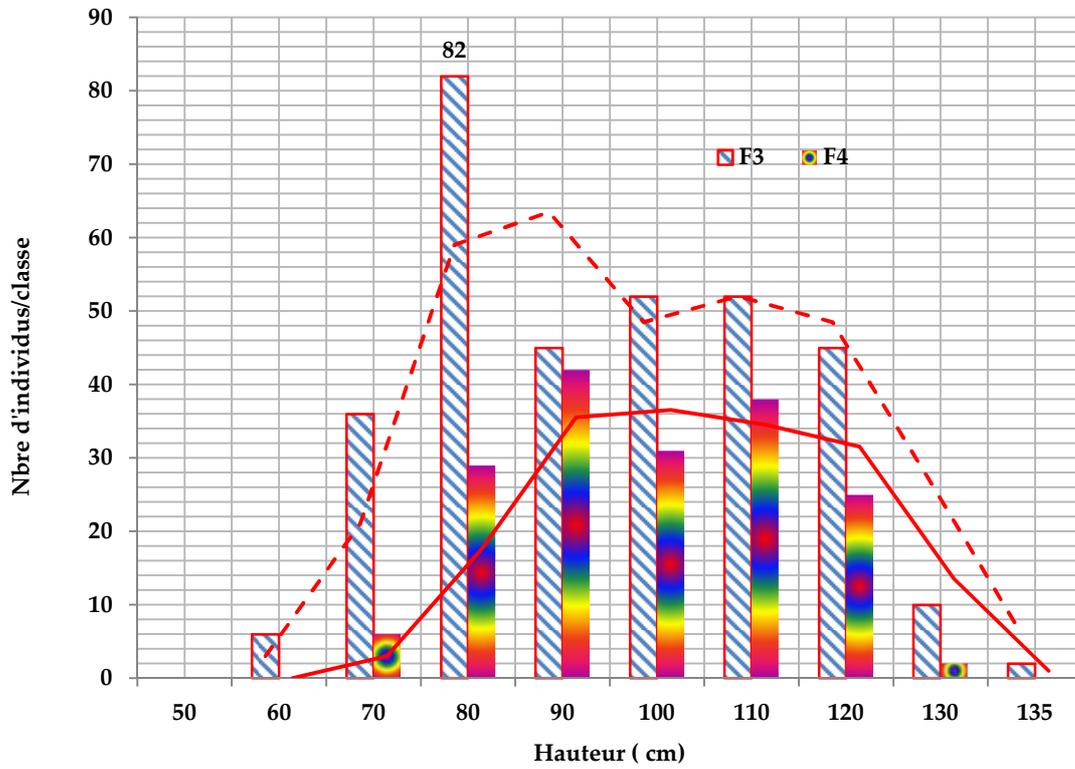


Figure 9. Valeurs moyennes caractéristiques de la hauteur de la plante des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

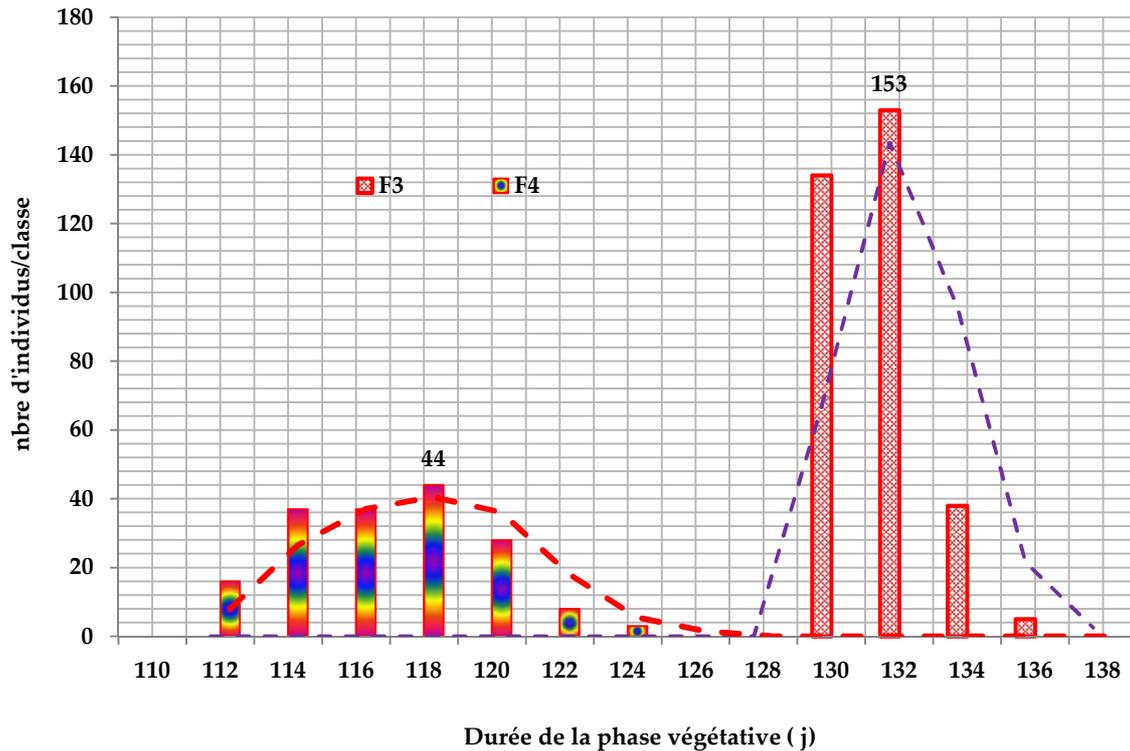


Figure 10. Valeurs moyennes caractéristiques de la durée de la phase végétative des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

Cette accélération du rythme de développement qui induit une réduction de la durée de la phase végétative de 15 jours, différence entre les moyennes des générations F3 et F4, suggère un effet des stress hydrique et surtout thermique, plus intenses, au cours de la conduite de la génération F4. Dans ce contexte Bouzerzour et Benmahammed (1994) mentionnent que les stress hydriques et thermiques de fin de cycle affectent plus les variétés tardives, proposant la sélection sur la base de la précocité au stade épiaison pour donner à la plante un cycle de développement qui lui permette d'esquiver les contraintes climatiques. Les résultats de la présente étude indiquent que l'ensemble des génotypes, aussi bien précoces que tardifs, sont affectés par les stress.

2.3. COMPOSANTES DU RENDEMENT EN GRAINS

2.3.1. GENERATION F3

Quoique la variation du nombre d'épis soit assez large, allant de 49.0 à 219.0 épis/m², autour d'une moyenne de la génération F3 de 99.7 épis/m², ces valeurs restent largement inférieures à celles couramment observées, en plein champ pour cette variable. L'expression réduite de cette composante du rendement en grains est sans nul doute dû à un effet négatif du milieu. En effet sur le même site expérimental, Hannachi (2017) rapporte des valeurs moyennes variant de 291.2 à 1736 épis/m².

Les coefficients de variation sont élevés, prenant des valeurs au-dessus de 20.0% et le degré de détermination génétique est juste moyen prenant une valeur 75.1%. Les différences entre les moyennes caractéristiques de cette génération sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de l'ordre de 10.9 épis/m² (Tableau 6). La distribution fréquentielle montre une concentration de plus de 73% des lignées ayant un nombre d'épis de 80 à 120, et 20% ont un nombre d'épis supérieur à ces valeurs et se présentent comme candidats à la sélection pour améliorer ce trait (Figure 11).

Les valeurs observées du nombre de grains par épi varient de 18.9 à 55.8 graines/épi autour d'une moyenne de 35.4 grains/épi. Les coefficients de variation de cette variable sont justes moyens, prenant des valeurs au-dessus de 15.0%. La plus petite différence significative est de 2.2 graines/épi et le degré de détermination génétique au sens large, avec une valeur de 73.3%, est juste moyen comme celui du nombre d'épis/m² (Tableau 6). La distribution fréquentielle montre une concentration de plus de 70% des lignées avec un nombre de grains par épi de 20 à 40. Il se trouve que 20% des lignées ont un nombre de grains par épi supérieur à ces valeurs et se présentent comme candidats à la sélection pour améliorer ce caractère (Figure 12).

Tableau 6. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héréritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des composantes du rendement de la génération F3 (n=330).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h^2_{bs}	CVp	CVg	Ppds
NE (/m ²)	99.7	49.0	219.0	239.0	721.5	75.1	31.1	26.9	10.9
NGE	35.4	18.9	55.8	10.5	28.7	73.3	17.7	15.1	2.2
PMG (g)	38.8	26.7	55.6	1.6	21.3	92.9	12.4	11.9	0.89
NGM ² (/m ²)	3489.4	1649.4	8371.0	246659.2	1035674.6	80.8	32.5	29.2	351.2

NE = nombre d'épis/m², NGE= nombre de grains par épi, PMG= poids de 1000 grains, NGM²= nombre de grains par m².

Les valeurs prises par le poids de 1000 grains et le nombre de grains/m² sont données au tableau 6. Ces valeurs montrent la présence de la variabilité. En effet le poids de 1000 grains prend des valeurs allant de 26.7 à 55.6 g, avec une moyenne de la génération de 38.8 g. Le nombre de grains par unité de surface emblavée varie de 1649.4 à 8371.0 grains/m² ; avec une moyenne de 3489.4 grains/m². Les coefficients de variations de ces deux variables sont moyens à élevés, notamment celui du nombre de grains/m². L'hérétabilité de ces deux variables est élevée, prenant des valeurs au-dessus de 80.0% (Tableau 6). La distribution fréquentielle de ces variables est donnée en figure 13 et 14.

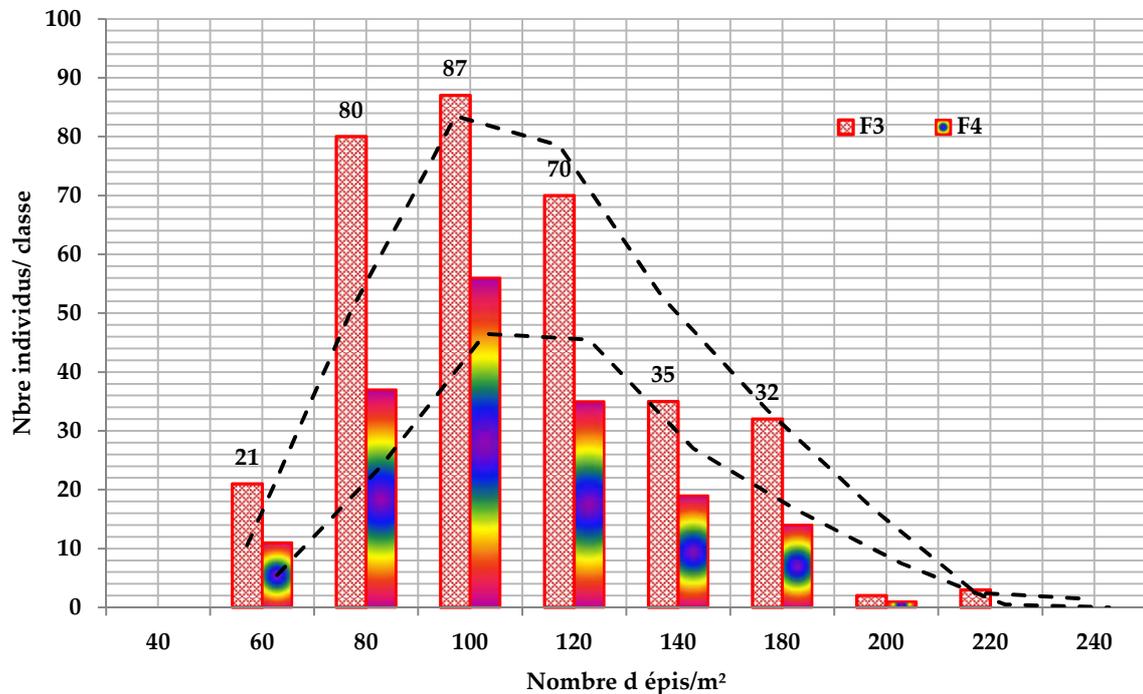


Figure 11. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre d'épis/m² des générations F3 et F4² (n_{F3} = 330 ; n_{F4}=174)

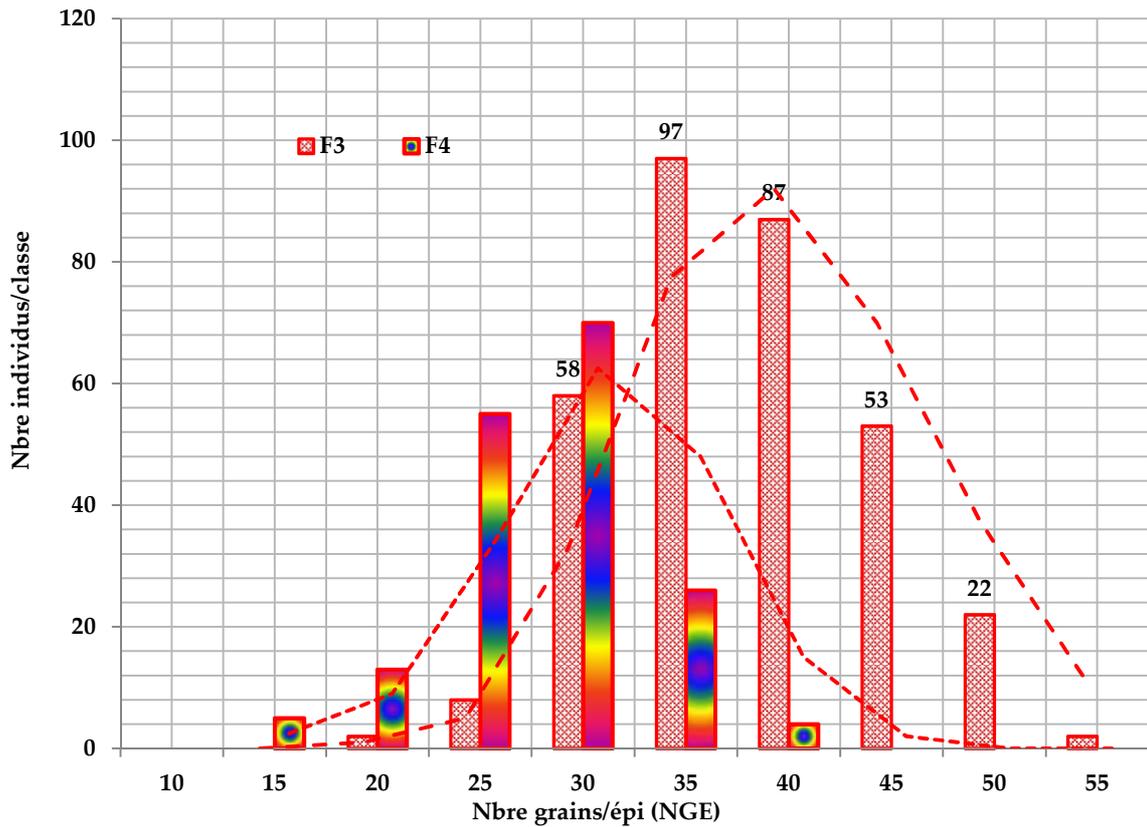


Figure 12. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains par épi des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

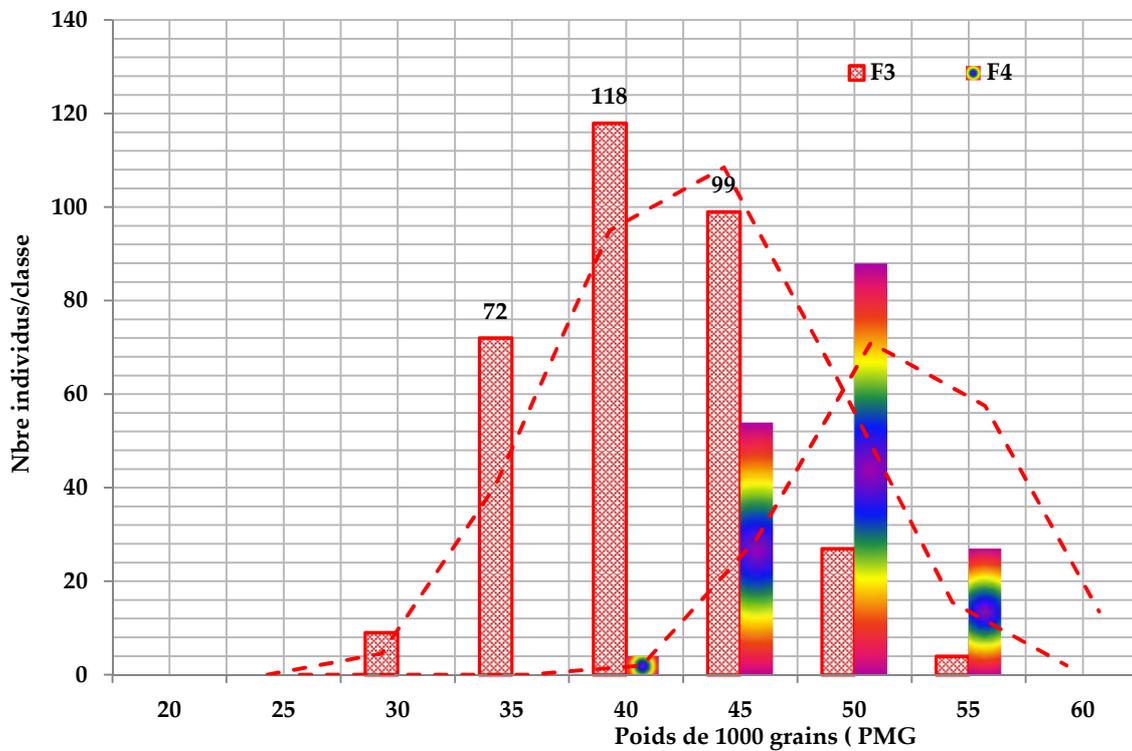


Figure 13. Valeurs moyennes caractéristiques du poids de 1000 grains des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

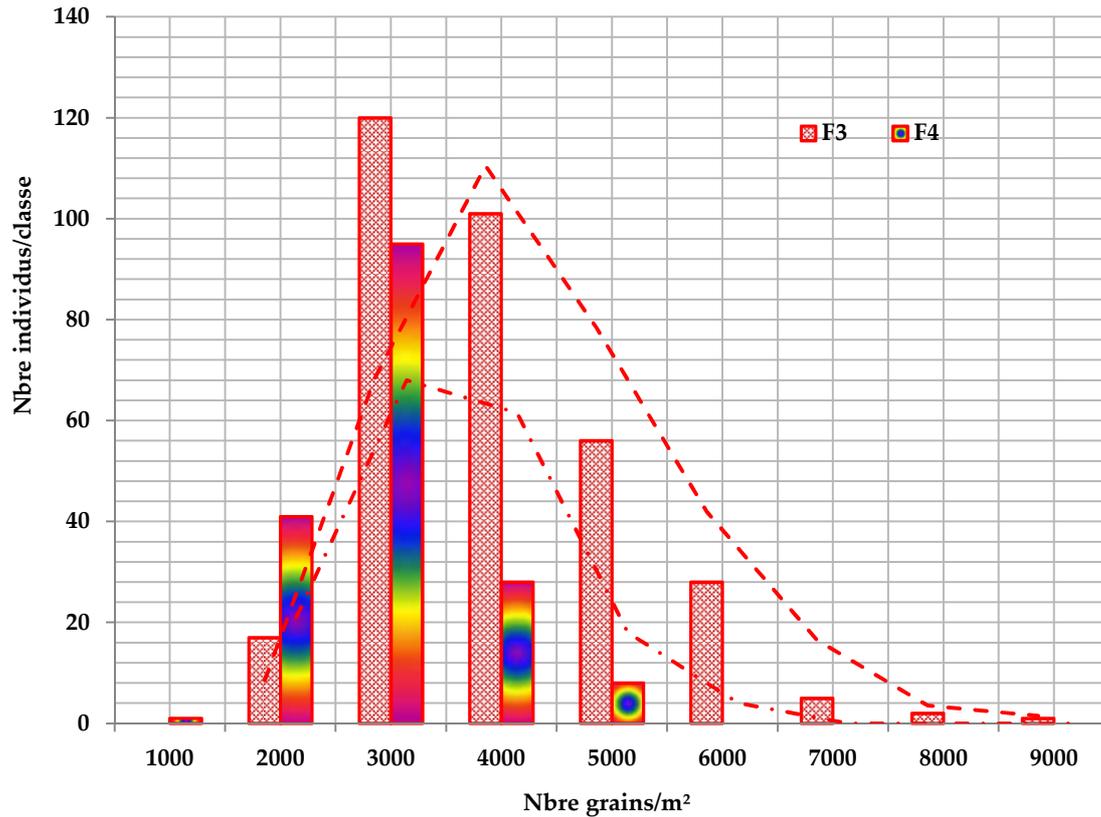


Figure 14. Valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains /m² des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$).

2.3.2. GENERATION F4

Le nombre d'épis de la génération F4, malgré un nombre de lignées retenues plus réduit, les moyennes des différentes classes fréquentielles restent assez similaires à celles notées chez la génération F3. On note cependant une réduction, en F4, des lignées extrêmes se caractérisant par des valeurs élevées du nombre d'épis (Figure 11). Les valeurs moyennes caractéristiques du nombre d'épis sont données au tableau 7. Elles varient de 48.0 à 190.0 autour d'une moyenne de la génération F4 de 98.9 épis/m².

Les différences entre les moyennes caractéristiques de cette génération sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de l'ordre de 31.0 épis/m². Les coefficients de variation, aussi bien phénotypique que génotypique, sont assez élevés, prenant des valeurs

supérieures à 15% pour le CVg et à 25% pour le CVp. La différence assez large entre les valeurs des CV suggèrent un effet environnement assez important qui affecte l'expression de ce caractère. La valeur juste moyenne prise par l'héritabilité au sens large tend à confirmer l'effet de l'environnement sur cette variable (Tableau 7).

La comparaison des courbes de fréquences des lignées de la génération F4 à celle de la génération F3, pour le nombre de grains par épi, montre une réduction assez marquée des lignées prometteuses. Ces résultats suggèrent que cette composante qui est le nombre de grains par épi, est fortement affectée, en F4, par le milieu. Cette réduction peut aussi avoir pour origine un effet de compensation qui s'instaure entre le nombre d'épis/m², qui se forme plutôt, et le nombre de grains par épi qui se met en place plus tardivement.

En effet le nombre d'épis est issu du tallage herbacé et de la capacité de la plante à faire monter en épi le plus grand nombre de talles. Cette capacité est dépendante de l'alimentation hydrique et azotée de la phase qui précède le stade épi-1cm (Kirby *et al.*, 1982). Plus la disponibilité en eau et en azote est importante plus le nombre d'épis s'exprime fortement. Cependant une production élevée d'épis/m² induit le plus souvent une réduction du nombre de grains par épi (Bensemane *et al.*, 2011).

Les valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains par épi varient de 10.1 à 39.9 autour d'une moyenne de la génération F4 de 25.7 grains/épi. Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 3.5 grains/épi. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique diffèrent fortement, le premier prend une valeur proche de 20% alors que le second prend une valeur inférieure à 10% (Tableau 7). On note, comme déjà mentionné pour le nombre d'épis/m², une différence assez large entre les valeurs prises par les CVp et CVg,

qui suggère un effet environnemental affectant l'expression de ce caractère. La valeur prise par l'héritabilité au sens large est cependant moyenne à forte (Tableau 7).

Tableau 7. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des composantes du rendement de la génération F4 (n=174).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h^2_{bs}	CVp	CVg	Ppds
NE (/m ²)	98.9	48.0	190.0	271.0	504.9	65.1	28.2	16.6	31.0
NGE	25.7	10.1	39.9	3.5	22.8	86.7	19.9	7.3	3.5
PMG (g)	46.4	37.3	54.4	2.2	9.2	81.0	7.2	3.2	2.8
NGM ²	2495.8	961.6	4647.8	171901.5	339972.2	66.4	28.7	16.6	780.6

NE = nombre d'épis/m², NGE= nombre de grains par épi, PMG= poids de 1000 grains, NGM²= nombre de grains par m².

La comparaison de la courbe de fréquence des lignées de la génération F4 à celle de la génération F3, du poids de 1000 grains, montre un décalage et un glissement des valeurs de la F4 vers la droite relativement aux valeurs prises par les lignées de la F3 (Figure 13). Ces résultats suggèrent que le milieu a été plus favorable à l'expression du poids de 1000 grains en F4 qu'en F3 soit en termes de conditions climatiques (humidité du sol et température), soit en termes de compensation entre le nombre de grains par épi et le poids individuel du grain. L'information apportée par la figure 3 suggère un environnement de la campagne agricole 2009/10 plus favorable au remplissage du grain, seul ou associé, a un effet de compensation.

Les valeurs moyennes caractéristiques du poids de 1000 grains varient de 37.3 à 54.4 g autour d'une moyenne de la génération F4 de 46.4 g. Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 2.8 g. Les coefficients de variation phénotypiques et génotypiques sont trop faibles (inférieurs à 10%) suggérant la faible variabilité pour ce caractère. En effet le poids de 1000 grains est la dernière composante qui se forme sous conditions de stress

intense, de sorte que le potentiel génétique s'exprime rarement, car il est réprimé par le milieu. La valeur prise par l'héritabilité au sens large est moyenne à forte (Tableau 7).

La comparaison de la courbe de fréquence des lignées de la génération F4 à celle de la génération F3, du nombre de grains/m², montre un décalage et un glissement des valeurs de la F4 vers la gauche relativement aux valeurs prises par les lignées de la F3 (Figure 14). Ces résultats suggèrent que le milieu a été défavorable à l'expression de ce caractère en F4 plus qu'en F3. Ceci complète l'information au sujet du comportement de poids de 1000 grains de cette génération suggérant la présence de la compensation entre le nombre de grains par épi et le poids individuel du grain.

Les valeurs moyennes caractéristiques du nombre de grains par m² varient de 961.6 à 4647.8 autour d'une moyenne de la génération F4 de 2495.8 grains/m². Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 780.6 grains/m². Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont assez larges suggérant la présence de la variabilité pour ce caractère. La valeur prise par l'héritabilité au sens large est faible à moyenne (Tableau 7).

2.4. RENDEMENTS GRAIN, ECONOMIQUE ET INDICE DE RECOLTE

2.4.1. GENERATION F3

Les valeurs moyennes caractéristiques du rendement en grains varient de 61.0 à 260.2 g/m², autour d'une moyenne de la génération F3 de 133.2 g/m². Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 11.8 g. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont assez élevées (supérieurs à 25.0%) suggérant la présence de la variabilité appréciable pour ce

caractère. Contrairement à ce qui est couramment rapporté la valeur prise par l'héritabilité au sens large est élevée (Tableau 8). En effet Hannachi (2017) trouve une héritabilité de 14.5% pour ce caractère en génération F3. La courbe des fréquences des lignées F3 est asymétrique à droite présentant la présence d'une proportion appréciable de lignées candidates à la sélection (Figure 15).

Tableau 8. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des rendements en grains et économiques et de l'indice de récolte de la génération F3 (n=330).

	Moy	Min	Max	σ^2e	σ^2g	h^2bs	CVp	CVg	Ppds
RDT (g/m ²)	133.2	61.0	260.2	279.5	1268.0	81.9	29.5	26.7	11.8
RDT _{éco} (g/m ²)	212.8	111.6	433.8	452.8	3384.3	88.2	29.1	27.3	15.0
IR (%)	34.1	18.0	49.3	9.6	22.8	70.3	16.7	14.0	2.2

RDT = Rendement en grains/m², RDT_{éco}= Rendement économique, IR = Indice de récolte.

Les valeurs moyennes caractéristiques du rendement économique varient de 111.6 à 433.8 g/m², autour d'une moyenne de la génération F3 de 212.8 g/m². Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 15.0 g. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont élevées (supérieurs à 25.0%) suggérant la présence de la variabilité appréciable pour ce caractère (Tableau 8). L'héritabilité de ce caractère en génération F3 est élevée. La courbe des fréquences des lignées F3 est asymétrique à droite présentant une proportion appréciable de lignées candidates à la sélection (Figure 16).

Les valeurs moyennes caractéristiques de l'indice de récolte varient de 18.0 à 49.3%, autour d'une moyenne de la génération F3 de 34.1%. Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 2.2%. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont juste moyens (de l'ordre de 15.0%) suggérant une présence moyenne de la variabilité pour ce caractère (Tableau 8). L'héritabilité de ce caractère en génération F3 est moyenne. La courbe des

fréquences des lignées F3 est symétrique présentant une proportion suffisante de lignées candidates à la sélection (Figure 17).

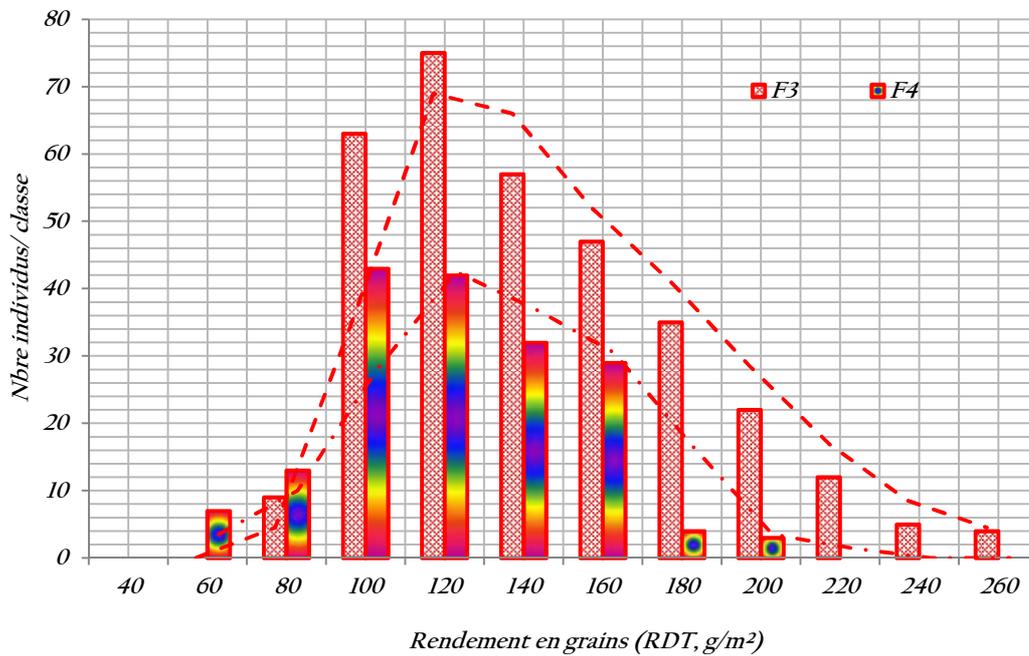


Figure 15. Valeurs moyennes caractéristiques du rendement en grains des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

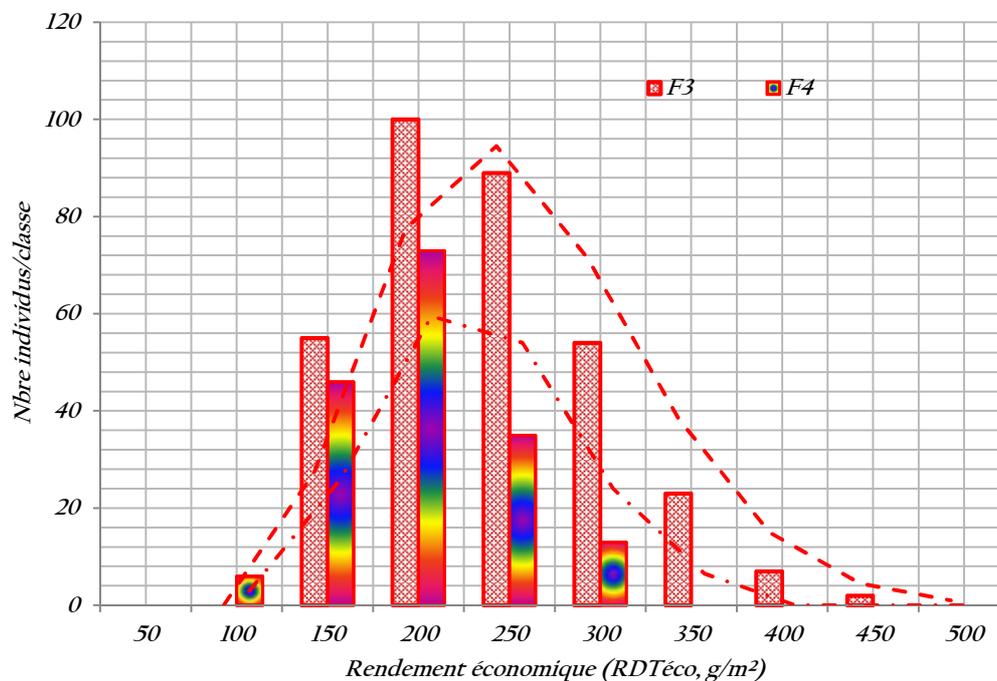


Figure 16. Valeurs moyennes caractéristiques du rendement économique des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$).

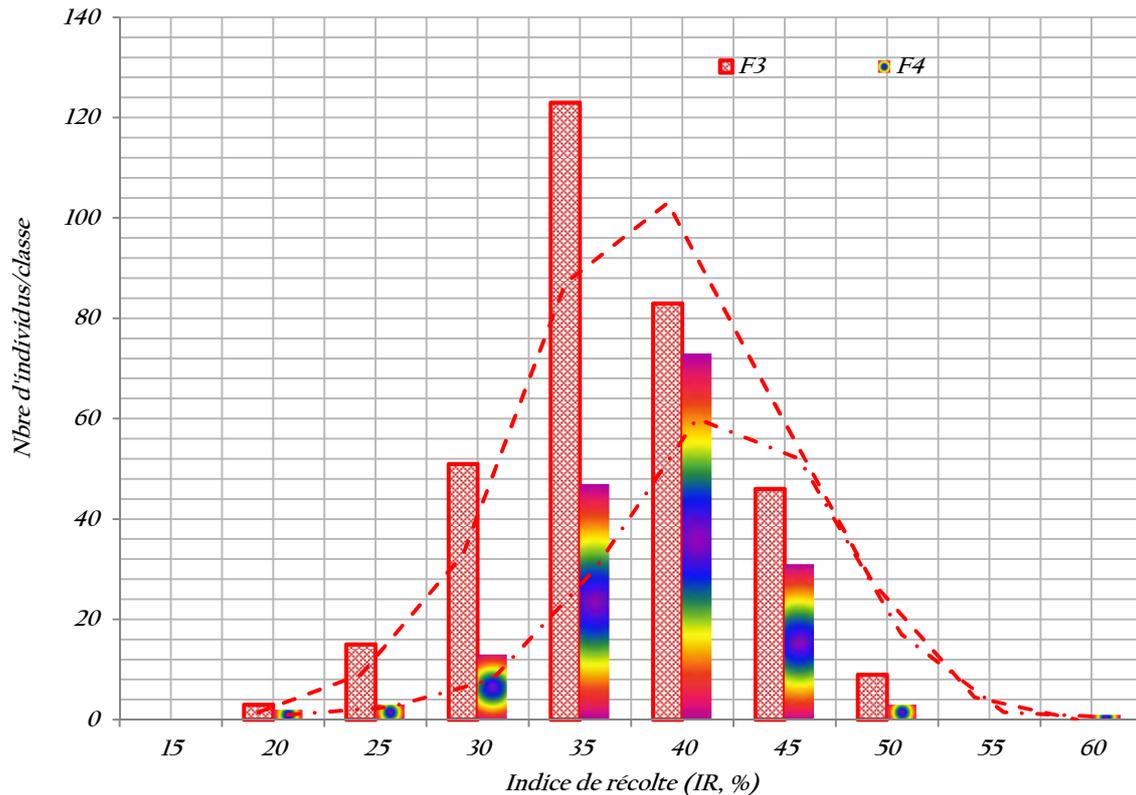


Figure 17. Valeurs moyennes caractéristiques de l'indice de récolte des générations F3 et F4 ($n_{F3} = 330$; $n_{F4}=174$)

2.4.2. GENERATION F4

La comparaison de la courbe de fréquence des lignées de la génération F4 à celle de la génération F3, du rendement en grains, montre un décalage et un glissement des valeurs de la F4 vers la gauche relativement aux valeurs prises par les lignées de la F3 (Figure 15). Ces résultats suggèrent que le milieu a été moins favorable à l'expression du rendement en grains, en F4 qu'en F3. Les causes étant d'ordre climatique notamment, cependant l'analyse de la figure 3, qui suggère un environnement de la campagne agricole 2009/10 plus favorable au remplissage du grain, ne supporte pas cette hypothèse explicative.

Les valeurs moyennes caractéristiques du rendement en grains varient de 43.0 à 214.8 g/m² autour d'une moyenne de la génération F4 de 115.7 g/m². Les

différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 42.9 g. Les coefficients de variation phénotypique et génotypique sont moyens à élevés suggérant la présence appréciable de la variabilité pour ce caractère. La valeur prise par l'héritabilité au sens large est faible, confirmant ce qui est couramment rapporté par la littérature (Tableau 9).

Tableau 9. Valeurs moyennes, minimales, maximales, variances génotypiques et environnementales, héritabilités au sens large (%), coefficients de variation (%) phénotypiques et génotypiques et plus petites différences significatives au seuil de 5% (Ppds) des rendements en grains et économiques et de l'indice de récolte de la génération F₄ (n=174).

	Moy	Min	Max	σ^2_e	σ^2_g	h ² bs	CVp	CVg	Ppds
RDT (g/m ²)	115.7	43.0	214.8	520.1	589.7	53.1	28.8	19.7	42.9
RDT _{éco} (g/m ²)	176.7	85.7	298.5	668.7	1401.4	67.7	25.7	14.6	48.7
IR (%)	36.2	19.8	57.5	4.9	22.5	82.0	14.5	6.1	4.2

RDT = Rendement en grains/m², RDT_{éco}= Rendement économique, IR = Indice de récolte.

La comparaison de la courbe de fréquence des lignées de la génération F₄ à celle de la génération F₃, du rendement économique, montre un décalage et un glissement des valeurs de la F₄ vers la gauche relativement aux valeurs prises par les lignées de la F₃ (Figure 16). Comme pour le rendement en grains, ces résultats suggèrent que le milieu a été moins favorable à l'expression du rendement économique, en F₄ qu'en F₃. Les valeurs moyennes caractéristiques du rendement économique varient de 85.7 à 298.5 g/m² autour d'une moyenne de la génération F₄ de 176.7 g/m².

Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 48.7 g. Le coefficient de variation phénotypique est élevé alors que le coefficient de variation génotypique est faible. La différence, assez large, entre les valeurs de ces deux coefficients est due à la contribution, plus importante, de la variance environnementale à la variabilité phénotypique. La valeur prise par l'héritabilité

au sens large est faible, comme celle du rendement en grains, prenant une valeur de 67.7% (Tableau 9).

La comparaison de la courbe de fréquence des lignées de la génération F4 à celle de la génération F3, de l'indice de récolte, montre un décalage et un glissement des valeurs de la F4 vers la droite relativement aux valeurs prises par les lignées de la F3 (Figure 16). Ces résultats suggèrent que le milieu a été plus favorable à l'expression de l'indice de récolte, en F4 qu'en F3. Les valeurs moyennes caractéristiques de l'indice de récolte varient de 19.8 à 57.5 % autour d'une moyenne de la génération F4 de 36.2%.

Les différences entre les moyennes caractéristiques sont significatives en comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative qui est de 4.2%. Le coefficient de variation phénotypique est moyen alors que le coefficient de variation génotypique est faible. La différence, assez large, entre les valeurs de ces deux coefficients est due à contribution, plus importante, de la variance environnementale à la variabilité phénotypique. La valeur prise par l'héritabilité au sens large est élevée, prenant une valeur de 82.0% (Tableau 9).

3. LIAISONS DES CARACTERES INTRA ET INTER GENERATIONS

3.1. LIAISONS EN F3

La biomasse est significativement liée à 8 variables parmi les 12 mesurées. Le coefficient de corrélation est supérieur 0.700 pour les liaisons avec la paille produite ($r= 0.973$, $P<0.000$), le poids des épis ($r= 0.912$, $P<0.000$), le nombre d'épis ($r= 0.829$, $P<0.000$), le nombre de grains par m² ($r= 0.755$, $P<0.000$), le rendement en grains ($r= 0.843$, $P<0.000$) et le rendement économique ($r= 0.971$, $P<0.000$). Il est de 0.333 ($P<0.00$) pour la liaison avec la hauteur de la plante et de -0.402 ($P<0.000$) pour la liaison avec l'indice de récolte. Le nombre de grains par épi, le poids de 1000 grains et la durée de la phase végétative ne présentent pas de liaisons significatives avec la biomasse aérienne (Tableau 10).

Ces résultats suggèrent que la sélection de la biomasse aérienne devrait être efficace et amène des améliorations appréciables, dans le sens positif, chez au moins 6 caractères (paille, poids des épis, nombre d'épis, nombre de grains/m², rendement en grains et rendement économique) des 12 mesurés. Cette sélection, sur la base de la biomasse aérienne, devrait apporter une amélioration, quoique moins importante, de la hauteur de la végétation et une réduction de l'indice de récolte, avec des effets moins contrôlés sur la fertilité, la taille du grain et la durée de la phase végétative (Tableau 10).

La paille montre des liaisons significatives avec la hauteur de la plante ($r=0.373$, $P<0.000$), le poids des épis ($r=0.833$, $P<0.000$), le nombre d'épis ($r=0.774$, $P<0.000$), le nombre de grains par épi ($r=-0.233$, $P<0.000$), le nombre de de grains/m² ($r=0.619$, $P<0.000$), le rendement grain ($r=0.697$, $P<0.000$), au rendement économique ($r=0.890$, $P<0.000$), à la durée de la phase végétative (Tableau 10). Ces résultats suggèrent que la sélection sur la base de la paille produite induit l'amélioration indirecte de la hauteur, du poids des épis, du nombre d'épis, des rendements en grains et économique et réduit l'indice de récolte et le nombre de grains par épi (Tableau 10).

Tableau 10. Coefficients de corrélation phénotypes entre les valeurs prises par les variables mesurées de la génération F3 (n=330, au-dessus de la diagonale, probabilités, et au-dessous de la diagonale, coefficients de corrélation).

	BIO	PLL	PHT	PE	NE	NGE	PMG	NGM ²	RDT	RDT éco	IR	DPV
BIO		0.000	0.000	0.000	0.000	0.102	0.157	0.000	0.000	0.000	0.000	0.281
PLL	0.973		0.000	0.000	0.000	0.000	0.076	0.000	0.000	0.000	0.000	0.961
PHT	0.333	0.373		0.022	0.155	0.000	0.000	0.369	0.002	0.000	0.000	0.113
PE	0.912	0.833	0.126		0.000	0.244	0.115	0.000	0.000	0.000	0.004	0.036
NE	0.829	0.774		0.859		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.108
NGE		-0.233	-0.254		-0.227		0.000	0.000	0.000	0.247	0.000	0.310
PMG			0.532		-0.250	-0.243		0.000	0.788	0.335	0.017	0.015
NGM ²	0.755	0.619		0.865	0.826	0.331	-0.376		0.000	0.000	0.009	0.067
RDT	0.843	0.697	0.166	0.897	0.777	0.265		0.910		0.000	0.021	0.001
RDT éco	0.971	0.890	0.272	0.942	0.840			0.855	0.947		0.001	0.036
IR	-0.402	-0.590	-0.367	-0.159	-0.195	0.618	-0.131	0.144	0.127	-0.183		0.000
DPV				-0.116			-0.134	-0.101	-0.180	-0.116	-0.213	

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², RDT=rendement en grains, RDTéco= Rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

Le rendement en grains présente des liaisons assez fortes avec la biomasse aérienne ($r=0.843$, $P<0.000$), le poids des épis ($r=0.897$, $P<0.000$), le nombre de grains par m^2 ($r=0.910$, $P<0.000$), et le rendement économique ($r=0.847$, $P<0.000$) (Tableau 10). Les liaisons avec la paille ($r=0.697$, $P<0.000$) et le nombre d'épis/ m^2 ($r=0.777$, $P<0.000$) sont moins intenses, et elles sont faibles avec la hauteur ($r=0.166$, $P<0.000$), le nombre de grains par épi ($r=0.265$, $P<0.000$), l'indice de récolte ($r=0.127$, $P<0.000$), et la durée de la phase végétative ($r=-0.180$, $P<0.000$) (Tableau 10).

L'analyse de ces liaisons indique que la sélection du rendement amène des améliorations de la biomasse aérienne, du rendement économique, du poids des épis et du nombre de grains/ m^2 . Ce caractère est complexe, sa mesure est sujette à des erreurs qui font que la sélection sur ce caractère est le plus souvent peu efficace. De plus ce caractère fait souvent l'objet d'interaction génotype x milieu, ce qui conduit à un changement de l'ordre de classement des performances des génotypes d'un site à l'autre, comme le rapportent plusieurs auteurs dont, Bendjamaa *et al.*, (2014) et Haddad *et al.*, (2016).

Le rendement économique présente des liaisons assez fortes avec la biomasse aérienne ($r=0.971$, $P<0.000$), la paille produite ($r=0.890$, $P<0.000$), le poids des épis ($r=0.942$, $P<0.000$), le nombre d'épis par m^2 ($r=0.840$, $P<0.000$), le nombre de grains par m^2 ($r=0.855$, $P<0.000$), et le rendement en grains ($r=0.947$, $P<0.000$) (Tableau 10). Les liaisons avec la hauteur ($r=0.272$, $P<0.000$), l'indice de récolte ($r=-0.183$, $P<0.000$), et la durée de la phase végétative ($r=-0.16$, $P<0.036$) sont plutôt de faibles valeurs (Tableau 10).

Le poids des épis présente des liaisons assez fortes, donc ayant un pouvoir prédictif assez élevé, avec le nombre d'épis ($r=-0.859$, $P<0.000$), le nombre de grains par m^2 ($r=0.865$, $P<0.000$), le rendement en grains ($r=0.897$, $P<0.000$), et le rendement économique ($r=0.942$, $P<0.000$). Les liaisons avec l'indice de récolte ($r=-0.159$, $P<0.000$) et avec la durée de la phase végétative ($r=-0.159$, $P<0.000$) sont de

signe négatives et moins fortes (Tableau 10). La sélection de cette caractéristique nécessite la mesure du rendement en grains, caractère complexe, et du rendement en paille, caractère fortement influence par le milieu. La sélection sur la base de ce caractère est onéreuse et lourde.

La sélection du poids des épis est similaire à celle du rendement en grains lui-même. Elle est moins précise parce qu'elle est sujette à de multiples erreurs d'échantillonnage, de manipulation lourde, au même titre que la détermination de la biomasse aérienne, de la paille produite et du rendement en grains ou économique. Ces caractères ne peuvent servir de critères de sélection indirecte que si leurs liaisons avec le caractère principal à améliorer est proche de l'unité. Ceci n'est pas toujours le cas, sous conditions contraignantes, comme celles qui caractérisent les hautes plaines orientales.

Les corrélations du nombre d'épis par m² qui attirent le plus l'attention sont celles qui relient ce caractère avec la biomasse ($r=-0.829$, $P<0.000$), la paille ($r=-0.774$, $P<0.000$), le poids des épis ($r=-0.859$, $P<0.000$), le nombre de grains par m² ($r=0.826$, $P<0.000$), le rendement en grain ($r=0.777$, $P<0.000$), et le rendement économique ($r=0.840$, $P<0.000$). Les corrélations de ce caractère avec le nombre de grains par épi ($r=-0.227$, $P<0.000$), le poids de 1000 grains ($r=-0.250$, $P<0.000$), et l'indice de récolte ($r=-0.195$, $P<0.000$) sont plutôt mitigées et de faibles valeurs, quoique significatives (Tableau 10). La mesure de ce caractère est relativement moins onéreuse que celles des variables discutées ci-dessus. Visuellement le matériel végétal sous sélection peut être classé en fonction de la capacité de production d'épis par unité de surface semée, puis éventuellement les différences entre les lignées les mieux classées peuvent être déduites par dénombrements des épis.

Le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains ne présentent de corrélations assez importantes qu'avec l'indice de récolte pour le nombre de grains

par épi ($r=0.617$, $P<0.000$), et avec la hauteur de la végétation pour le poids de 1000 grains ($r=0.532$, $P<0.000$). Les corrélations avec les autres traits sont assez faibles en valeurs et généralement de signe négatifs (Tableau 10). Ces résultats indiquent qu'à l'intérieur de la génération F3, la sélection du nombre de grains par épi améliore sensiblement l'indice de récolte et que les meilleurs poids de 1000 grains se trouvent généralement chez les lignées à hautes paille.

Le nombre de grains par m^2 , le rendement en grains et le rendement économiques, outre les corrélations élevées qui existent entre eux ($r=0.910$, $r=0.855$, $r=0.947$, $P<0.000$), présentent en plus des corrélations très élevées en valeurs avec la biomasse aérienne ($r=0.755$, $r=0.843$, $r=0.971$, $P<0.000$), la paille ($r=0.219$, $r=0.697$, $r=0.590$, $P<0.000$), le poids des épis ($r=0.865$, $r=0.897$, $r=0.942$, $P<0.000$) et le nombre d'épis par m^2 ($r=0.826$, $r=0.777$, $r=0.840$, $P<0.000$) (Tableau 10). Ces résultats indiquent que la biomasse aérienne, la paille produite et les nombre et le poids des épis influencent positivement le rendement aussi bien en grains qu'économique ainsi que le nombre de grains produit par unité de surface. La durée de la phase végétative a le moins d'influence sur les autres caractères, probablement parce que ce caractère est peu variable à l'intérieur du matériel végétal étudié (Tableau 10).

L'analyse des corrélations entre les variables mesurées de la génération F3 suggère que les caractères influençant le plus le rendement en grains, le nombre de grains par m^2 et le rendement économiques sont la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis. Ces caractères sont à prendre en considération lors du criblage de cette génération pour l'amélioration des caractères d'intérêts, soit individuellement soit sous forme de combinaison de caractères.

3.2. LIAISONS ENTRE CARACTERES EN F4

La lecture des coefficients de corrélations phénotypiques confirme ce que a été noté en F3 que les sept caractères, qui sont la biomasse , la paille, le poids et le

nombre des épis, le nombre de grains par m², et les rendements économique et en grains, présentent des corrélations très élevées entre eux (Tableau 11).

Tableau 11. Coefficients de corrélation phénotypes entre les valeurs prises par les variables mesurées de la génération F4 (n=174, au-dessus de la diagonale, probabilités, au-dessous de la diagonale, coefficients de corrélation).

	BIO	PLL	PHT	PE	NE	NGE	PMG	NGM ²	RDT	RDT éco	IR	DPV
BIO		0.000	0.071	0.000	0.000	0.001	0.282	0.000	0.000	0.000	0.727	0.473
PLL	0.952		0.014	0.000	0.000	0.226	0.826	0.000	0.000	0.000	0.000	0.540
PHT		0.187		0.616	0.014	0.002	0.142	0.964	0.677	0.250	0.093	0.000
PE	0.897	0.741			0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000	0.675
NE	0.680	0.627		0.643		0.000	0.018	0.000	0.000	0.000	0.253	0.007
NGE	0.246		0.236	0.377	-0.340		0.251	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PMG				0.148	-0.179			0.243	0.027	0.091	0.014	0.007
NGM ²	0.857	0.679		0.931	0.675	0.426			0.000	0.000	0.000	0.871
RDT	0.876	0.686		0.962	0.628	0.436	0.168	0.964		0.000	0.000	0.460
RDT éco	0.969	0.846		0.959	0.676	0.351	0.129	0.940	0.968		0.000	0.452
IR		-0.273		0.382		0.480	0.187	0.457	0.491	0.266		0.534
DPV			0.290		-0.204	0.296	-0.205					

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², RDT=rendement en grains, RDTéco= Rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative

Les corrélations de nombre de grains par épi, du poids de 1000 grains, de l'indice de récolte et de la durée de la phase végétative, avec les autres caractères, sont faibles ou non significatives. La hauteur de la végétation et la durée de la phase végétative sont les traits qui présentent le moins de relations significatives avec les autres variables mesurées (Tableau 11).

Ces résultats confirment partiellement ceux rapportés par plusieurs auteurs. Ainsi de par l'étude des corrélations, Abbassenne *et al.*, (1997) soulignent que les meilleurs rendements en grains en zones semi arides sont le résultat de la capacité génétique à produire plus d'épis par unité de surface associée à une bonne fertilité.

Bouzerzour *et al.*, (1998) mentionnent que la contribution du nombre de grain par m² vient plus du nombre de grains par épi (caractère plus variable) que du nombre d'épis par m² qui se forme en période plus favorable, caractère moins variable. Par contre Nachit et Jarrah (1986) rapportent que le poids moyen du

grain joue un rôle important dans la détermination du rendement en grains dans les environnements semi-arides.

Meziani *et al.*, (2011) ainsi que Bensemmane *et al.*, (2011) rapportent que l'amélioration du nombre d'épis par m² est rapportée comme étant une cause de l'augmentation du rendement en grains des nouvelles variétés, vu que les changements intervenus chez les nouvelles variétés pour le nombre de grains par m² sont plus dues au nombre d'épis produits qu'au nombre de grains par épi.

Parmi les 12 variables mesurées, dans cette présente étude, seules la biomasse et le rendement en grains sont d'un grand intérêt en sélection pour la région ciblée. En effet le milieu ciblé étant semi-aride, la recherche de variétés qui valorisent le peu de pluie reçu est un objectif important de la sélection, même si le degré de répartition de cette biomasse aérienne entre le grain et la paille a le même intérêt (Bouzerzour *et al.*, 1998). Dans ce contexte, seules les corrélations de ces deux variables seront analysées, dans ce qui suit.

4. EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS INTRA GENERATION

4.1. DETERMINANTS DE LA BIOMASSE AERIENNE EN F3

Les analyses de régressions multiples sont traditionnellement employées dans l'objectif de prédire ou d'expliquer une variable-critère par un ensemble de variables prédictives. Avec 9 degrés de libertés, le carré moyen de la régression est significatif, suggérant que les 9 caractères inclus dans le modèle expliquent largement la variation notée chez la biomasse mesurée en F3, avec un coefficient de détermination de 100% (Tableau 12). L'analyse des coefficients de régression partiels, indique cependant que certains caractères, parmi les 9 inclus dans le modèle, ne contribuent pas significativement à l'explication de la variation de la biomasse aérienne de la génération F3. En effet cette analyse indique que les coefficients de régression partiels associés aux nombres d'épis/m² et des grains par épi et à la durée de la phase végétative ne sont pas significativement différents de zéro.

Les résultats de l'analyse de la régression confirment l'important rôle joué par la paille, le poids des épis et le nombre de grains par m² dans la détermination de la biomasse aérienne. Mais ils sont en contradiction avec les résultats de l'analyse des corrélations pour ce qui est du rôle joué par le nombre d'épis par m², la hauteur de la végétation, le poids de 1000 grains et l'indice de récolte. L'analyse de la régression suggère que le nombre d'épis par m² ne joue pas un rôle significatif dans la formation de la biomasse, alors que l'analyse de la corrélation, au contraire, attribue à ce caractère un rôle important. L'analyse des coefficients de corrélation ne suggère pas de rôle significatif de la hauteur de la végétation, du poids de 1000 grains et de l'indice de récolte alors que l'analyse de la régression leur attribue un rôle significatif dans la formation de la biomasse aérienne (Tableaux 10 et 12).

Tableau 12. Régression de la biomasse aérienne sur les variables pertinentes de la génération F3 (n=330).

SOURCE	Ddl	SCE	CME	F	Prob>F
Régression	9.00	4979246.32	553249.59	19744.13	0.000
Résiduelle	320.00	8966.71	28.02		
Total	329.00	4988213.03			
R	R ²	F	Prob.>F	DF1	DF2
1.000	1.000	19744.13	0.00	9	320
Variable	β	B	SE _b	t	Prob>t
PLL	0.819	1.091	0.016	68.389	0.000
PHT	0.008	0.055	0.022	2.482	0.014
PE	0.037	0.072	0.016	4.627	0.000
NE	-0.003	-0.013	0.058	-0.226	0.822
NGE	0.001	0.017	0.171	0.099	0.921
PMG	0.098	2.511	0.132	19.084	0.000
NGM ²	0.246	26.731	1.461	18.292	0.000
HI	0.066	1.421	0.180	7.913	0.000
DPV	-0.001	-0.057	0.223	-0.254	0.799
Constant = -142.053					

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

L'analyse des effets directs et indirects estimés par l'analyse en chemin indique que les effets directs des variables mesurées sur la détermination de la biomasse aérienne, les plus importants en valeur, reviennent à la paille produite (0.819) et au nombre de grains par m² (0.246). Les autres caractères présentent des effets directs faibles en valeurs (Tableau13).

Les effets indirects positifs, les plus importants en valeurs, sont dus à la paille via le nombre de grains par m² (0.152), à la hauteur de la paille via la paille (0.305), le poids des épis via la paille (0.682) et via le nombre de grains par épi (0.213), le nombre d'épis via la paille (0.634) et le nombre de grains par m² (0.203), le nombre de grains par m² via la paille (0.507).

Les effets indirects négatifs, les plus importants sont dus au nombre de grains par épi via la paille (-0.191) et à l'indice de récolte via la paille (-0.483) (Tableau 13). Ces résultats indiquent que, hormis le poids de 1000 grains et la durée de la phase végétative qui ne semblent pas avoir d'effet sur l'expression de la biomasse de la génération F3, la hauteur, le nombre et le poids des épis, les nombres de grains par m², et par épi et l'indice de récolte affectent indirectement, via la paille produite, la formation de la biomasse aérienne.

Tableau 13. Effets directs (en gras) et indirects des variables déterminantes de la biomasse aérienne de la génération F3 (n=330).

	PLL	PHT	PE	NE	NGE	PMG	NGM	HI	DPV	ri/BIO
PLL	0.819	0.003	0.031	-0.002	0.000	0.010	0.152	-0.039	0.000	0.973
PHT	0.305	0.008	0.005	0.000	0.000	0.052	-0.012	-0.024	0.000	0.333
PE	0.682	0.001	0.037	-0.003	0.000	-0.009	0.213	-0.010	0.000	0.912
NE	0.634	0.001	0.032	-0.003	0.000	-0.025	0.203	-0.013	0.000	0.829
NGE	-0.191	-0.002	0.002	0.001	0.001	-0.024	0.081	-0.013	0.000	-0.090
PMG	0.080	0.004	-0.003	0.001	0.000	0.098	-0.093	-0.009	0.000	0.078
NGM	0.507	0.000	0.032	-0.002	0.000	-0.037	0.246	0.009	0.000	0.755
HI	-0.483	-0.003	-0.006	0.001	0.001	-0.013	0.035	0.066	0.000	-0.402
DPV	-0.002	-0.001	-0.004	0.000	0.000	-0.013	-0.025	-0.012	-0.001	-0.060

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

La paille, le nombre et le poids des épis, agissent aussi indirectement via le nombre de grains par m². Ainsi le rendement en paille et le nombre de grains par m², contribuent directement et indirectement via les autres caractères à la formation de la biomasse. La biomasse aérienne apparaît comme un caractère complexe issu de la contribution positive de 5 caractères, et de la contribution négative, de 2 caractères sur les 9 mesurés, dont la paille et le nombre de grains par m² sont les traits les plus déterminants. Le criblage de ces deux caractéristiques devrait déboucher sur l'identification de lignées présentant une biomasse aérienne élevée.

4.2. DETERMINANTS DU RENDEMENT EN GRAINS EN F3

Avec 7 degrés de libertés, le carré moyen de la régression est significatif, suggérant que les 7 caractères inclus dans le modèle expliquent largement la variation du rendement en grains mesurée en F3, avec un coefficient de détermination de 96% (Tableau 14). L'analyse des coefficients de régression partiels, indique que parmi les 7 variables incluses dans le modèle, la durée de la phase végétative ne contribue pas significativement à l'explication de la variation du rendement en grains de la génération F3. Le coefficient de régression partiel associé à la durée de la phase végétative n'est pas significativement différent de zéro (Tableau 14). Le modèle retenu indique qu'en plus des trois composantes du rendement, la paille, la hauteur de la végétation et l'indice de récolte affectent significativement la formation du rendement en grains.

Tableau 14. Régression du rendement en grains sur les variables pertinentes de la génération F3 (n=330).

SOURCE	Ddl	SCE	CME	F	Prob.>F
Régression	7	488710.51	69815.78	1101.60	0.000
Résiduelle	322	20407.14	63.37		
Total	329	509117.65			
r	R ²	F	Prob.>F	DF1	DF2
0.98	0.96	1101.60	0	7	322
Variables	β	B	SE _b	t	Prob.>t
BIO	0.697	0.169	0.023	7.397	0.000
PHT	0.034	0.075	0.032	2.341	0.020
NE	0.683	0.867	0.058	14.858	0.000
NGE	0.404	2.541	0.175	14.503	0.000
PMG	0.266	2.188	0.186	11.758	0.000
HI	0.293	2.027	0.265	7.637	0.000
DPV	0.005	0.149	0.333	0.447	0.655
Constant = -268.220					

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

L'analyse des effets directs et indirects indique que les effets directs, les plus importants en valeur, reviennent à la Biomasse aérienne (0.397), au nombre d'épis (0.683), au nombre de grains par épis (0.404), au poids de 1000 grains (0.266), et à l'indice de récolte (0.293). La hauteur agit indirectement via plusieurs traits (Tableau15).

En effet la biomasse aérienne, en plus de son effet direct important, agit indirectement par l'intermédiaire du nombre d'épis (0.528) et de l'indice de récolte (-0.173). La hauteur agit indirectement via la paille (0.148), le nombre de grains par épi (-0.106), le poids de 1000 grains (0.141) et l'indice de récolte (-0.108). En plus de son effet direct, le nombre d'épis agit indirectement via la paille (0.307). Le coefficient de corrélation qui lie le nombre de grains par épi au rendement en grains est composé d'un effet indirect négatif via le nombre d'épis (-0.155) et d'un effet indirect positif via l'indice de récolte (0.181) en plus de l'effet direct déjà cité (Tableau 15).

Tableau 15. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes du rendement en grains de la génération F3 (n=330).

	BIO	PHT	NE	NGE	PMG	HI	DPV	ri/Rdt
BIO	0.697	0.013	0.528	-0.094	0.026	-0.173	0.000	0.697
PHT	0.148	0.034	0.054	-0.103	0.141	-0.108	0.000	0.166
NE	0.307	0.003	0.683	-0.092	-0.067	-0.057	0.000	0.777
NGE	-0.092	-0.009	-0.155	0.404	-0.064	0.181	0.000	0.265
PMG	0.039	0.018	-0.171	-0.098	0.266	-0.038	-0.001	0.015
HI	-0.234	-0.012	-0.133	0.250	-0.035	0.293	-0.001	0.128
DPV	-0.001	-0.003	-0.060	-0.023	-0.036	-0.062	0.005	-0.180

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

Le coefficient de corrélation qui lie le poids de 1000 grains au rendement en grains est composé d'un effet indirect négatif via le nombre d'épis (-0.171) en plus de l'effet direct. Le coefficient de corrélation qui lie l'indice de récolte au rendement en grains est composé d'effets indirects négatifs via la paille (-0.234) et le nombre d'épis (-0.133) et d'un effet indirect positif via le nombre de grains par épi (0.250) en plus de l'effet direct déjà cité (Tableau 15). Ces résultats indiquent que, hormis la durée de la phase végétative qui ne semble pas avoir d'effet sur l'expression du rendement en grains de la génération F3, la hauteur, la paille produite, l'indice de récolte et les composantes du rendement jouent un rôle important, directement et indirectement, dans la formation du rendement en grains.

A l'inverse de la biomasse aérienne qui semble déterminée par deux caractères qui sont la paille et le nombre de grains par m², en plus des effets indirects via d'autres traits, le rendement en grains apparaît plus complexe et comme la résultante d'effets directs et indirects de plusieurs caractères dont les composantes du rendements, la hauteur, l'indice de récolte et la paille produite.

Ces résultats suggèrent que la sélection indirecte monocaractère pour améliorer le rendement risque de ne pas être efficace, au même titre que la sélection directe, suite au nombre élevé de variables déterminant ce caractère, et que la sélection sur index serait probablement plus efficace. En effet selon Menad

et al., (2011) la sélection du rendement grain n'est efficace que si les conditions de milieu qui ont permis la réalisation d'un rendement en grains donné, se répètent de façon régulière.

Dans ce contexte, Bahlouli *et al.*, (2005) montrent que les effets directs des composantes sur le rendement en grains sont positifs. Ceci indique que si on réussit à maintenir constantes les moyennes des composantes non prises comme critères de sélection, on peut améliorer le rendement par augmentation de la composante utilisée comme critère de sélection. Cependant selon Benmahammed *et al.*, (2010), il est pratiquement difficile de contrôler la variation des composantes non prises en compte dans le processus de sélection, suite à la présence de l'interaction génotype x environnements.

Selon Bouzerzour et Benmahammed, (1994), en zones semi-arides, les meilleurs rendements sont essentiellement déterminés par le nombre d'épis/m² et surtout par le nombre de grains produit par unité de surface emblavée qui est le produit du nombre d'épis/m² par le nombre de grains par épi. Par contre Mc Neal *et al.*, (1978) et Laala, (2010) affirment que le poids de 1000 grains est un bon critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains.

Selon plusieurs études dont celles de Bouzerzour *et al.*, (1998), Fellah *et al.*, (2002), Benmahammed *et al.*, (2004), Bahlouli *et al.*, (2005), Benmahammed *et al.*, (2008) et Benmahammed *et al.*, (2010), le frein à la réalisation de progrès de rendement en grains, significatif et stable, sous conditions climatiques variables, résulte de la variation du degré d'expression de la multitude de caractères qui conditionnent le rendement en grains. L'identification des combinaisons de caractères, les plus fréquentes et les plus liées au rendement en grains dans le milieu ciblé est souhaitable pour réaliser du progrès dans ce domaine.

En effet, selon Acevedo et Ceccarelli (1989), l'approche basée sur la sélection d'une combinaison de caractères apparaît, théoriquement, plus efficace, car elle offre la possibilité d'évaluer le rôle des caractères, individuellement ou en combinaison, dans des fonds génétiques assortis aléatoirement. Bensemane (2015) rapporte que les différentes méthodes utilisées (corrélations, régressions, analyse en chemin, indice de sélection et analyse en composantes principales) pour identifier des critères de sélection, indiquent le nombre de grains/m², le poids des épis, la biomasse et le nombre d'épis/m², comme déterminants du rendement en grains. Ceci concorde avec les résultats de la présente étude.

4.3. DETERMINANTS DE LA BIOMASSE AERIENNE EN F4

Comme en F3, le modèle de la régression retient 9 caractères qui expliquent largement la variation notée chez la biomasse mesurée en F4, avec un coefficient de détermination de 0.999% (Tableau 16). Cependant l'analyse des coefficients de régression partiels, indique que, parmi les 9 caractères retenus par le modèle, 5 caractères présentent des coefficients de régression non significativement différents de zéro et donc ils ne contribuent pas significativement à l'explication de la variation de la biomasse aérienne de la génération F4 (Tableau 16). Ces caractères sont la hauteur de la plante, le poids des épis, le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et la durée de la phase végétative.

Les caractères qui contribuent significativement à la formation de la biomasse de la génération F4 sont la paille produite, le poids de 1000 grains, le nombre de grains produit par m² et l'indice de récolte (Tableau 16). Comparativement au modèle retenu pour la génération F3, celui de la génération F4 ne retient pas la hauteur de la plante et le nombre d'épis. Ces résultats sont en contradiction avec les résultats de l'analyse des corrélations qui attribue un rôle significatif au nombre d'épis, mais pas d'effets significatifs à la hauteur de la végétation, au poids de 1000 grains et à l'indice de récolte (Tableaux 11 et 16).

Tableau 16. Régression de la biomasse aérienne sur les variables pertinentes de la génération F4 (n=174).

Source	DF	SS	MS	F	Prob.>F
Régression	9	1068516.70	118724.07	23980.95	0
Résiduelle	163	806.97	4.95		
Total	172	1069323.67			
r	R ²	F	Prob.>F	DF1	DF2
1.000	0.999	23980.95	0.000	9	163
Variable	B	B	SE _b	T	Prob.>t
PLL	0.698	1.054	0.019	55.746	0.000
PHT	0.000	0.002	0.014	0.124	0.901
PE	0.014	0.025	0.015	1.658	0.099
NE	0.002	0.007	0.027	0.254	0.800
NGE	-0.001	-0.019	0.119	-0.158	0.874
PMG	0.097	2.262	0.107	21.203	0.000
NGM ²	0.365	0.040	0.002	24.615	0.000
HI	0.028	0.417	0.154	2.706	0.008
DPV	0.002	0.058	0.071	0.807	0.421
Constant = -126.99					

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

En F4, les effets directs affectant la biomasse aérienne, les plus importants en valeur, reviennent à la paille produite (0.698) et au nombre de grains par m² (0.365). Ces résultats rejoignent les résultats observés pour la génération F3 (Tableaux 13 et 17). Les effets indirects positifs, les plus importants en valeurs, sont dus à la paille via le nombre de grains par m² (0.248), à la hauteur de la paille via la paille (0.131), le poids des épis via la paille (0.517) et via le nombre de grains par épi (0.340), le nombre d'épis via la paille (0.438) et via le nombre de grains par m² (0.256), et le nombre de grains par m² via la paille (0.474). En plus l'indice de récolte présente des effets indirects, négatif via la paille (-0.191) et positif via le nombre de grains par m²(0.167) (Tableau 17). La différence entre les deux générations réside dans l'absence de l'effet du nombre de grains par épi en F4 alors qu'en F3 ce caractère intervient indirectement via la paille produite (Tableaux 13 et 17).

Tableau 17. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes de la biomasse aérienne de la génération F4 (n=174).

	PLL	PHT	PE	NE	NGE	PMG	NGM	HI	DPV	ri/BIO
PLL	0.698	0.000	0.010	0.001	0.000	0.002	0.248	-0.008	0.000	0.952
PHT	0.131	0.000	0.001	0.000	0.000	0.011	-0.001	-0.004	0.000	0.138
PE	0.517	0.000	0.014	0.001	0.000	0.014	0.340	0.011	0.000	0.897
NE	0.438	0.000	0.009	0.002	0.000	-0.017	0.246	0.002	0.000	0.680
NGE	0.065	0.000	0.005	-0.001	-0.001	0.009	0.155	0.013	0.001	0.246
PMG	0.012	0.000	0.002	0.000	0.000	0.097	-0.032	0.005	0.000	0.083
NGM	0.474	0.000	0.013	0.001	0.000	-0.009	0.365	0.013	0.000	0.857
HI	-0.191	0.000	0.005	0.000	0.000	0.018	0.167	0.028	0.000	0.026
DPV	-0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.020	-0.005	0.001	0.002	-0.055

BIO= Biomasse aérienne, PLL= paille produite, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative.

4.4. DETERMINANTS DU RENDEMENT EN GRAINS EN F4

La régression multiple, avec 7 caractères et un coefficient de détermination de 99%, explique significativement la variation du rendement en grains de la génération F4, (Tableau 18). L'analyse des coefficients de régression partiels, indique que parmi les 7 variables incluses dans le modèle, la hauteur de la plante ne contribue pas significativement à l'explication de la variation du rendement en grains de la génération F4. Le coefficient de régression partiel associé à cette variable n'est pas significativement différent de zéro (Tableau 18). Le modèle retenu indique qu'en plus des trois composantes du rendement, la biomasse aérienne, la durée de la phase végétative et l'indice de récolte affectent significativement la formation du rendement en grains (Tableau 18).

Tableau 18. Régression du rendement en grains sur les variables pertinentes de la génération F4 (n=174).

Source	DF	SCE	CME	F	Prob.>F
Régression	7	186004.61	26572.08	895.85	0.000
Résiduelle	165	4894.06	29.66		
Totale	172	190898.68			
r	R ²	F	Prob.>F	DF1	DF2
0.987	0.974	895.85	0.000	7	165
Variables	B	B	SE _b	T	Prob.>t
BIO	0.695	0.443	0.032	13.96	0.000
PHT	-0.027	-0.062	0.033	-1.898	0.059
NE	0.205	0.246	0.063	3.900	0.000
NGE	0.186	1.210	0.272	4.454	0.000
PMG	0.067	0.661	0.190	3.475	0.001
HI	0.560	3.562	0.265	13.427	0.000
DPV	-0.042	-0.495	0.165	-2.991	0.003
Constant = -126.849					

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, HI=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative

Les effets directs, les plus importants en valeur, sont ceux de la biomasse aérienne (0.695), de l'indice de récolte (0.560), du nombre d'épis (0.205), et du nombre de grains par épis (0.186) (Tableau19). La biomasse agit aussi sur le rendement en grains par l'indirectement par l'intermédiaire du nombre d'épis (0.129) et l'indice de récolte (-0.153). Le nombre d'épis agit aussi indirectement via la biomasse (0.436), et le nombre de grains par épi via l'indice de récolte (0.269).

L'indice de récolte et la hauteur agissent aussi indirectement via la biomasse sur la formation du rendement, avec des effets indirects négatif pour le premier caractère cité (-0.190) et positif pour le second (0.130). Le poids de 1000 grains agit indirectement via l'indice de récolte (0.105) alors que seule la durée de la phase végétative ne manifeste pas d'effets directs et indirects sur le rendement (Tableau 18).

Tableau 19. Effets directs (en diagonale) et indirects des variables déterminantes du rendement en grains de la génération F4 (n=174).

	BIO	PHT	NE	NGE	PMG	HI	DPV	ri/RDT
BIO	0.695	-0.005	0.129	0.017	0.001	-0.153	0.002	0.686
PHT	0.130	-0.027	-0.038	0.044	0.008	-0.072	-0.012	0.032
NE	0.436	0.005	0.205	-0.063	-0.012	0.049	0.009	0.628
NGE	0.064	-0.006	-0.070	0.186	0.006	0.269	0.000	0.437
PMG	0.012	-0.003	-0.037	0.016	0.067	0.105	0.009	0.169
HI	-0.190	0.003	0.018	0.089	0.013	0.560	-0.002	0.491
DPV	-0.033	-0.008	-0.042	0.055	-0.014	0.027	-0.042	-0.057

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, HI=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative

Ces résultats indiquent que la biomasse aérienne, les deux premières composantes du rendement en grains et l'indice de récolte affectent significativement la formation du rendement en grains. Comme en F3, les résultats suggèrent qu'en F4, la sélection indirecte monocaractère pour améliorer le rendement risque de ne pas être efficace, suite au nombre élevé de variables déterminant ce caractère, et que la sélection sur index serait probablement plus efficace.

Comparativement, les résultats de l'analyse en chemin de Fellahi *et al.*, (2013a) accordent un rôle important à la biomasse aérienne et à l'indice de récolte comme critères indirects pour améliorer les rendement en grains d'un diallèle incomplet de blé tendre. Ces auteurs rapportent des valeurs des effets directs de 1.051 et 0.364, respectivement pour ces deux variables. Hannachi *et al.*, (2013b) rapportent que le rendement en grains d'un demi diallèle de blé dur était significativement et positivement lié à la biomasse aérienne, et aux deux premières composantes du rendement et que l'analyse de la régression pas à pas ne retient que la biomasse aérienne et l'indice de récolte comme déterminants du rendement en grains.

Les résultats de la présente étude concordent aussi avec ceux de Dabi *et al.*, (2016) qui rapportent des effets directs positifs conséquents de la biomasse et de l'indice de récolte sur le rendement en grains du blé tendre. Ces auteurs

recommandent que la constitution de fonds génétiques, le choix des parents à croiser et la sélection pour augmenter le rendement doivent être basés sur ces deux caractéristiques.

Mecha *et al.*, (2017) rapportent des effets directs positifs de la biomasse aérienne (1.14), du nombre de grains par épi (0.374) et de l'indice de récolte (0.780) sur le rendement en grains. Ces auteurs suggèrent de tenir compte de la variation de ces variables lors de la sélection pour améliorer le rendement du blé tendre. Des résultats similaires sont rapportés par Akcura (2011), Ali et Shakor (2012), Peymaninia *et al.*, (2012), Hannachi *et al.*, (2013b), et Gelalcha et Hanchinal (2013). Okuyama *et al.*, (2004) proposent que le nombre d'épis, celui des grains par épi et la biomasse aérienne doivent être considérés lors de la sélection pour améliorer le rendement en grains.

5. DEGRE DE RESSEMBLANCE ENTRE GENERATIONS F3-F4

Les résultats de l'analyse des corrélations, des régressions et de l'analyse en chemin suggèrent les variables qui sont les plus influentes dans la formation de la biomasse aérienne et du rendement en grains. Cette étape est nécessaire pour engager une sélection efficace. Elle doit être cependant complétée par l'analyse de la ressemblance entre apparentés des deux générations successives F3 et F4. Un degré de ressemblance, appréciable, signifie que la génération descendante ressemble à la génération parentale, ce qui augmente l'efficacité de la sélection. Au contraire peu de ressemblance entre apparentés conduit à l'inefficacité de la sélection pratiquée (Bouzerzour *et al.*, 1998).

L'analyse des coefficients de corrélations de rang inter générations F3 et F4 des variables mesurées indique l'absence de ressemblance entre les générations pour la biomasse aérienne, la paille, le poids des épis, le nombre de grains par épi, le nombre de grains par m², le rendement en grains, et le rendement économique,

dont les coefficients en sont pas statistiquement significatifs au seuil de 5% (Tableau 20). Par contre il y a une meilleure ressemblance entre générations pour la hauteur de la végétation (0.769**, Figure 18), le nombre d'épis par m² (0.194*), le poids de 1000 grains (0.211**), l'indice de récolte (0.193*), et la durée de la phase végétative (0.432**).

Tableau 20. Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les générations F3-F4 des différentes variables mesurées (n-2 =172).

	BIO3	PLL3	PHT3	PE3	NE3	NGE3	PMG3	NGM ² 3	RDT3	Reco3	IR3	DPV3
	Probabilité											
BIO4	0.598	0.415	0.014	0.932	0.593	0.847	0.573	0.906	0.872	0.685	0.543	0.135
PLL4	0.935	0.635	0.000	0.617	0.809	0.958	0.954	0.460	0.596	0.771	0.219	0.795
PHT4	0.893	0.494	0.000	0.374	0.006	0.168	0.061	0.163	0.489	0.724	0.028	0.052
PE4	0.235	0.218	0.721	0.437	0.048	0.391	0.530	0.547	0.371	0.258	0.851	0.001
NE4	0.349	0.298	0.677	0.529	0.015	0.262	0.746	0.479	0.429	0.353	0.667	0.006
NGE4	0.732	0.659	0.000	0.708	0.735	0.765	0.152	0.438	0.411	0.492	0.091	0.001
PMG4	0.592	0.421	0.000	0.772	0.023	0.056	0.008	0.581	0.846	0.702	0.200	0.006
NGM4	0.264	0.458	0.010	0.418	0.029	0.490	0.583	0.287	0.230	0.197	0.180	0.000
RDT4	0.207	0.307	0.902	0.449	0.158	0.780	0.109	0.476	0.248	0.179	0.476	0.000
Reco4	0.349	0.322	0.220	0.660	0.300	0.790	0.293	0.772	0.510	0.370	0.989	0.009
IR4	0.279	0.980	0.000	0.174	0.057	0.382	0.010	0.135	0.067	0.108	0.015	0.000
DPV4	0.903	0.794	0.725	0.213	0.652	0.040	0.006	0.087	0.261	0.536	0.055	0.000
	Coefficients de corrélation de rang de Spearman											
BIO4	0.042	0.065	0.195	0.007	0.043	-0.015	0.045	-0.010	0.013	0.033	-0.049	-0.119
PLL4	-0.007	0.038	0.280	-0.040	-0.019	-0.004	0.005	-0.059	-0.042	-0.023	-0.098	-0.021
PHT4	0.011	0.055	0.769	-0.071	-0.216	0.110	0.149	-0.112	-0.055	-0.028	-0.175	0.155
PE4	0.095	0.099	-0.029	0.062	0.158	-0.069	0.050	0.048	0.072	0.091	0.015	-0.258
NE4	0.075	0.083	-0.033	0.050	0.194	-0.090	-0.026	0.057	0.063	0.07334	0.034	-0.218
NGE4	0.027	-0.035	-0.327	0.030	0.027	0.024	0.114	0.062	0.066	0.055	0.135	-0.264
PMG4	0.043	0.064	0.554	0.023	-0.181	0.152	0.211	-0.044	0.016	0.031	-0.102	0.219
NGM4	0.089	0.059	-0.204	0.065	0.173	-0.055	0.044	0.085	0.096	0.103	0.107	-0.332
RDT4	0.101	0.082	-0.010	0.061	0.113	-0.022	0.128	0.057	0.092	0.107	0.057	-0.284
Reco4	0.075	0.079	0.098	0.035	0.083	-0.021	0.084	0.023	0.053	0.072	-0.001	-0.208
IR4	0.087	0.002	-0.395	0.109	0.152	-0.070	0.203	0.119	0.146	0.128	0.193	-0.286
DPV4	0.010	-0.021	0.028	0.100	0.036	0.164	-0.220	0.137	0.090	0.050	0.153	0.432

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative, des générations F3 et F4

De plus, la hauteur de la végétation de la génération F3 présente des liaisons significatives et positives avec la biomasse aérienne (0.195*), la paille produite (0.280**), et le poids de 1000 (0.554**), et négatives avec le nombre de grains par épi (-0.327**), celui des grains par m² (-0.204**), et l'indice de récolte (-0.395**) de la génération F4 (Tableau 20). Ces résultats suggèrent que les lignées F3 hautes

produisent une descendance qui se caractérise, en plus de la hauteur, par une meilleure expression de la biomasse, de la paille et du poids de 1000 grains accompagnées par une réduction des nombres de grains par épi et par m², et de l'indice de récolte, comparativement aux lignées F3 de courte taille (Tableau 20).

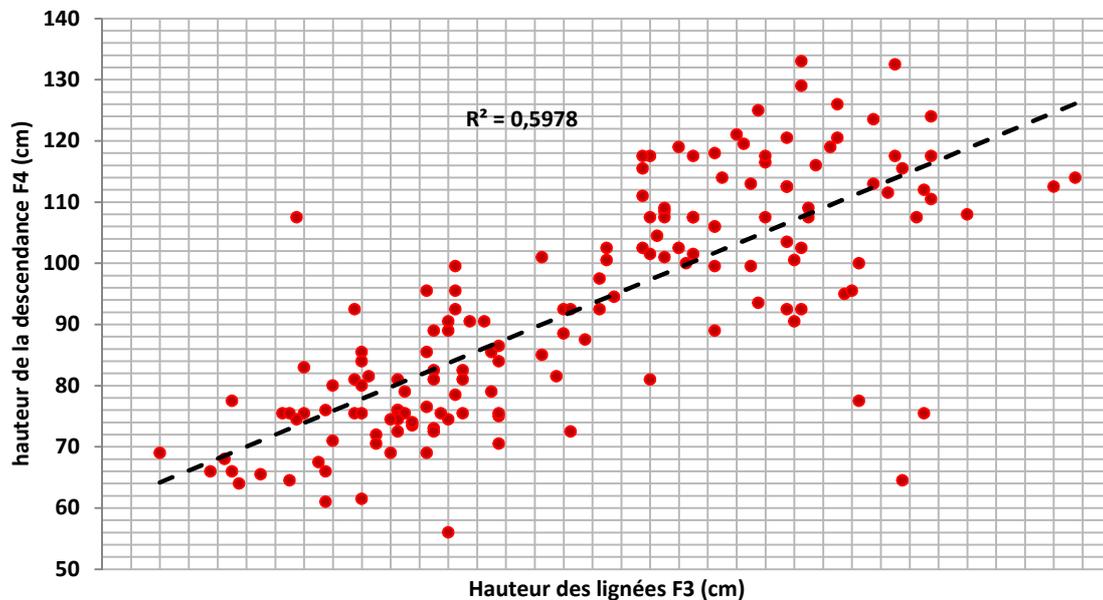


Figure 18. Ressemblance entre les lignées F3 et leurs descendants F4 pour la hauteur de la végétation.

Cette analyse indique que si la sélection est pratiquée en F3 pour des lignées courtes de tailles, elle induirait une amélioration de la fertilité, du nombre de grains par m² et de l'indice de récolte chez les lignées descendantes en F4. Cette amélioration semble avoir un prix à payer qui se matérialise par des réductions de la biomasse aérienne, de la paille produite, de la hauteur et du poids de 1000 grains qui sont aussi des traits désirables chez un génotype destiné aux zones sèches. Cette sélection ne fournit aucune information au sujet du sens de la variation des rendements en grains et économique (Tableau 20).

Les lignées de la génération F3, de bonnes valeurs pour le nombre d'épis par m², ont tendance à avoir une descendance F4, présentant un poids des épis, un nombre d'épis et de grains par m² élevés, une hauteur et un poids de 1000 grains

relativement réduits, comparativement aux lignées F3 de faibles valeurs pour le nombre d'épis (Tableau 20). La sélection sur la base de cette caractéristique aura tendance à améliorer les nombre d'épis et de grains par m², mais en contrepartie, elle réduira de la hauteur et du poids de 1000 grains des lignées sélectionnées.

Les lignées de la génération F3, de bonnes valeurs pour le poids de 1000 grains, ont tendance à avoir une descendance F4, présentant un poids de 1000 grains et un indice de récolte élevés, dans un fond génétique précoce à l'épiaison, comparativement aux lignées F3 de faibles valeurs pour le poids de 1000 grains (Tableau 20). La sélection sur la base de cette caractéristique aura tendance à améliorer trois caractéristiques qui généralement désirables : gros grain, meilleur répartition de la matière sèche produite entre grains et paille et précocité d'épiaison.

Les lignées de la génération F3, de bonnes valeur pour l'indice de récolte ont tendance à avoir une descendance F4 de bonne valeur pour l'indice de récolte mais qui est courte de taille et tardive au stade épiaison. Les lignées de la génération F3 qui divergent pour la durée de la phase végétative, présentent une descendance qui diffère pour plusieurs caractéristiques (Tableau 20). Ainsi les lignées F3 tardives produisent une descendance tardive, haute de taille et de bonne valeur pour le poids de 1000 grains, mais qui présentent aussi de faibles valeurs pour le poids des épis, les nombres des épis, de grains par m², et de grains par épi, les rendements en grains et économique et l'indice de récolte (Tableau 20). Ces résultats suggèrent que la sélection en F3 pour la précocité serait accompagnée chez la descendance F4 par une amélioration sensible de plusieurs caractéristiques désirables dont le rendement en grains.

6. REGRESSION PARENTS-DESCENDANCE

En plus du degré de ressemblance, l'héritabilité au sens étroit est indicatrice de l'efficacité de la sélection sur la base du caractère considéré. Dans la présente étude cette caractéristique a été estimée par la régression des lignées F3 sur leurs descendants F4 selon la méthode décrite par Smith et Kinman (1965). L'analyse des valeurs obtenues indique que l'héritabilité au sens étroit de la biomasse aérienne, de la paille produite, du poids des épis, du nombre de grains par épi, du nombre de grains par m², du rendement en grains et économique est nulle (Tableau 21).

Tableau 21. Coefficients de régression de la génération descendante F₄ sur la génération parentale F3 et héritabilité au sens étroit des différentes variables mesurées (n =174).

Variable	b	SE _b	t _{obs}	Prob.>t	h ² ns
BIO	0.039	0.048	0.818	0.415	0.0223
PLL	0.040	0.042	0.955	0.341	0.0229
PHT	0.613	0.040	15.227	0.000	0.3503
PE	0.059	0.055	1.081	0.281	0.0337
NE	0.156	0.069	2.252	0.026	0.0891
NGE	0.040	0.064	0.621	0.536	0.0229
PMG	0.174	0.057	3.058	0.003	0.0994
NGM ²	0.057	0.047	1.190	0.232	0.0326
RDT	0.067	0.063	1.077	0.283	0.0383
RDTeco	0.047	0.055	0.856	0.393	0.0269
IR	0.142	0.044	3.227	0.037	0.0811
DPV	1.000	0.001	9438.859	0.000	0.5714

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², RDTeco= Rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative, b=coefficient de régression, SE= erreur standard du coefficient de régression, t= t calculé pour le coefficient de régression, h²ns= héritabilité au sens étroit.

Ces résultats suggèrent que la variation observée chez ces différentes variables est plus d'origine environnementale que d'origine génétique et que la sélection en F3, sur la base de ces traits, serait peu efficace. Par contre la hauteur de la végétation, le nombre d'épis par m², le poids de 1000 grains, l'indice de récolte et la durée de la phase végétative présentent des h²ns significatives. Les valeurs de h²ns sont moyennes pour la durée de la phase végétative (57.14%) et la

hauteur (35.03%), et faible pour le nombre d'épis (8.91%), le poids de 1000 grains (9.94%) et l'indice de récolte (8.11%, Tableau 21).

7. DIFFÉRENTIELLE DE SÉLECTION, RÉPONSES DIRECTE ET CORRELATIVES EN F4 A LA SÉLECTION EN F3

Le principe de la sélection est de faire évoluer ou de changer la moyenne de la population soumise à la sélection dans le sens désiré. Ce changement ou progrès de la sélection est estimé par la différence entre la moyenne des sujets sélectionnés et la moyenne de leurs descendances. Le progrès de la sélection dépend de la supériorité de la fraction sélectionnée, supériorité estimée par la différentielle de la sélection (S), et du degré de transmission de la capacité génétique de la fraction sélectionnée à la descendance. Le degré de transmission génétique est estimé par l'héritabilité (h^2).

Falconer (1981) définit, en effet, la réponse à la sélection (R) comme étant le produit entre la différentielle de la sélection et l'héritabilité (Sh^2). Hallauer et Miranda (1981) mentionnent que si les caractères ciblés par la sélection sont génotypiquement corrélés, la sélection sur la base d'un de ces caractères induit indirectement des changements significatifs chez les autres traits avec lesquels il est génotypiquement corrélé. Falconer (1981) mentionne que le mérite ou l'efficacité de la sélection indirecte relativement à la sélection directe (RSE) est mesuré par le rapport de la réponse corrélative (CR) sur la réponse directe (R) attendues.

La différentielle de la sélection mesurée en F3, les réponses directes et corrélatives et l'héritabilité réalisée, observées en F4, suite à la sélection sur la base des caractères à héritabilité au sens étroit moyenne comme la hauteur et la durée de la phase végétative, faible, comme le nombre d'épis, l'indice de récolte et le poids de 1000 grains et nulle comme le rendement en grains et la biomasse

aérienne, sont données au tableau 22. L'analyse des données de ce tableau indique que comparativement aux valeurs prises par la Ppds5% de la génération F3, les valeurs de la différentielle de la sélection sont largement significatives.

Tableau 22. Différentielle de sélection (S) en F3, Réponse directe (R) et Corrélative de la sélection (CR) et héritabilité réalisée, en F4, des caractères utilisés comme critères de sélection en F3 (n =174).

	BIO	PLL	PHT	PE	NE	NGE	PMG	NGM	RDT	Rdtéco	IR	DPV
S _{F3}			-55.38									
R/CR _{F4}	-16.48	-21.12	-30.36	4.53	11.61	-0.36	-2.46	247.74	4.64	-1.69	2.96	0.01
h ² réal			0.548									
S _{F3}					99.61							
R/CR _{F4}	23.79	18.76	-4.77	9.01	16.90	-2.42	-0.37	149.29	5.03	10.66	-0.99	-1.05
h ² réal					0.170							
S _{F3}							14.72					
R/CR _{F4}	-4.65	3.24	30.08	-10.87	-16.70	2.11	2.00	-292.58	-7.89	-6.91	-1.56	1.70
h ² réal							0.136					
S _{F3}											18.62	
R/CR _{F4}	-11.54	-16.37	-18.08	-4.65	11.20	-1.80	1.31	46.38	4.83	-0.08	2.59	-2.90
h ² réal											0.139	
S _{F3}												4.25
R/CR _{F4}	-2.08	-7.21	-1.08	2.80	0.90	1.17	-1.49	180.92	5.12	2.96	2.10	3.00
h ² réal												0.706
S _{F3}	420.94											
R/CR _{F4}	22.90	16.07	7.48	8.86	5.10	-0.32	0.56	118.11	6.83	11.65	-0.57	-0.60
h ² réal	0.054											
S _{F3}									134.92			
R/CR _{F4}	23.5	10.7	-4.6	13.5	13.5	-0.6	1.4	211.4	12.8	16.0	1.5	-1.4
h ² réal									0.095			
Ppds _{F3}												
Ppds _{F4}	92.6	51.5	3.9	46.6	31.0	3.5	2.8	780.6	42.9	48.7	4.2	1.4

BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m², RDT= rendement en grains, Rdtéco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative, S= différentielle de sélection, R= réponse à la sélection, CR= réponse corrélative à la sélection, h²réal = héritabilité réalisée.

Comparativement à la ppds5% de la génération F4, les valeurs prises par la réponse directe sont significatives pour les caractères à héritabilité moyenne comme la hauteur (-30.36 cm vs 3.9 cm), et la durée de la phase végétative (3.0 j vs 1.4 jours). Elles sont non significatives pour les caractères dont l'héritabilité est faible à nulle, comme le nombre d'épis (16.90 épis vs 31.0 épis), le poids de 1000 grains (2.0 g vs 2.8 g), l'indice de récolte (2.59% vs 4.2%), le rendement en grains (12.8 g vs 42.9 g) et la biomasse aérienne (22.90 g vs 92.6 g) (Tableau 22).

La sélection, dans le sens de la réduction de la hauteur, n'induit aucun changement significatif des moyennes des autres caractères mesurés et non pris en compte dans le processus de la sélection (Figure 19). L'utilisation de la hauteur comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains n'est pas efficace, non plus. En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/PHT}$) lorsque la sélection est faite sur la base de la hauteur, on note que l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de $36.25\% = (R_{RDT}/CR_{RDT/PHT}) 100 = (4.64/12.8)100$ (Tableau 22, Figure 19)

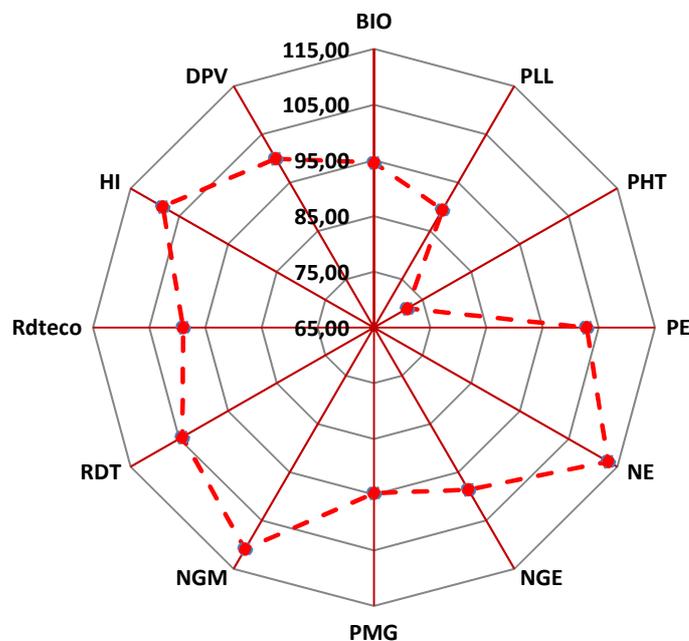


Figure 19. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées L relativement aux 20 lignées H ($100 \cdot L/H$), sélectionnées sur la base de la hauteur de la végétation (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m^2 , RDT= rendement en grains, RDTéco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

La sélection, dans le sens de l'augmentation du nombre d'épis par unité de surface en F3 induit une réduction significative de la hauteur de la descendance de

la fraction sélectionnée et aucun changement significatif des moyennes des autres caractères mesurés et non pris en compte dans le processus de la sélection (Figure 20, Tableau 22). L'utilisation du nombre d'épis comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains n'est pas efficace, non plus. En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/NE}$) lorsque la sélection est faite sur la base du nombre d'épis, l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de 39.25% (Tableau 22, Figure 20)

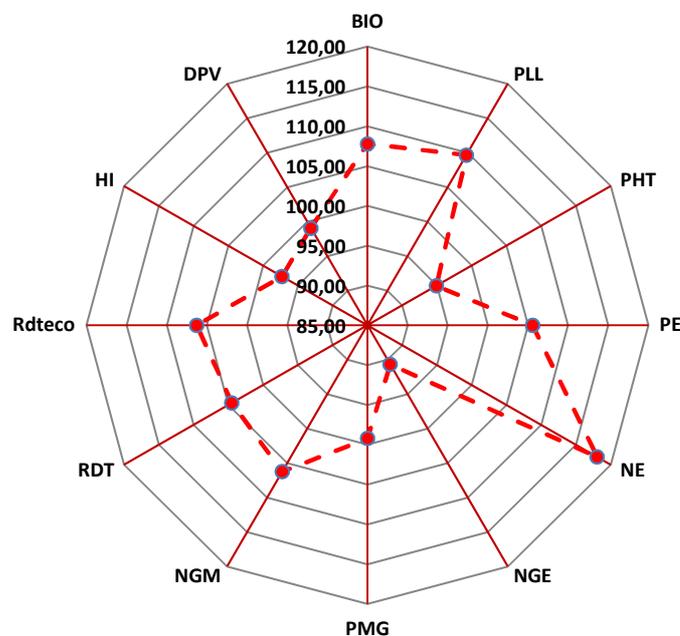


Figure 20. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L ($100 \cdot H/L$), sélectionnées sur la base du nombre d'épis par unité de surface emblavée (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², RDT= rendement en grains, RDTéco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

La sélection, dans le sens de l'augmentation du poids de 1000 grains, en F3, induit une augmentation significative de la hauteur de la végétation de 30.08 cm et un allongement significatif de la durée de la phase végétative de 1.7 jours, et aucun changement significatif des moyennes des autres caractères mesurés et non pris en compte dans le processus de la sélection (Figure 21, Tableau 22). L'utilisation du poids de 1000 grains comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains n'est pas efficace, avec une tendance à la réduction de ce dernier caractère. En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/NE}$) lorsque la sélection est faite sur la base de l'augmentation du poids de 1000 grains, l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de -61.49% (Tableau 22, Figure 21).

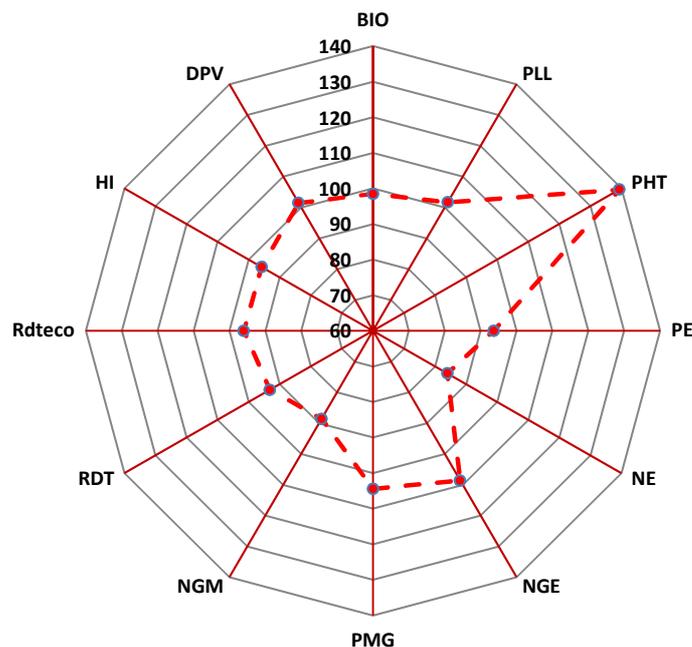


Figure 21. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L ($100 \cdot H/L$), sélectionnées, en F3, sur la base du poids de 1000 grains (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM²= Nombre de grains par m², RDT= rendement en grains, RDTéco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

La sélection, dans le sens de l'augmentation de l'indice de récolte, en F3, induit une réduction significative de la hauteur de la végétation de 18.08 cm et de la durée de la phase végétative de 2.9 jours, et aucun changement significatif des moyennes des autres caractères mesurés et non pris en compte dans le processus de la sélection (Figure 22, Tableau 22). L'utilisation de l'indice de récolte comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains n'est pas efficace. En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/NE}$) lorsque la sélection est faite sur la base de l'indice de récolte, l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de 37.71% (Tableau 22, Figure 22).

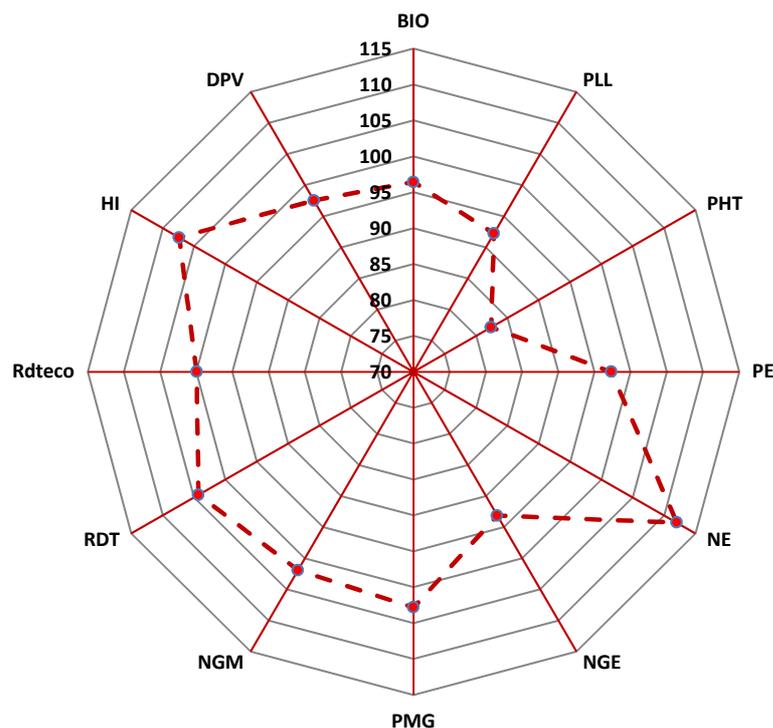


Figure 22. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L ($100 \times H/L$), sélectionnées, en F3, sur la base de l'indice de récolte (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m², RDT= rendement en grains, RDTeco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

La sélection, dans le sens de la réduction de la durée de la phase végétative, n'induit aucun changement significatif des moyennes des autres caractères mesurés et non pris en compte dans le processus de la sélection (Figure 23). L'utilisation de la durée de la phase végétative comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains n'est pas efficace. En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/PHT}$) lorsque la sélection est faite sur la base de la durée de la phase végétative, on note que l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de 39.94% (Tableau 22, Figure 23).

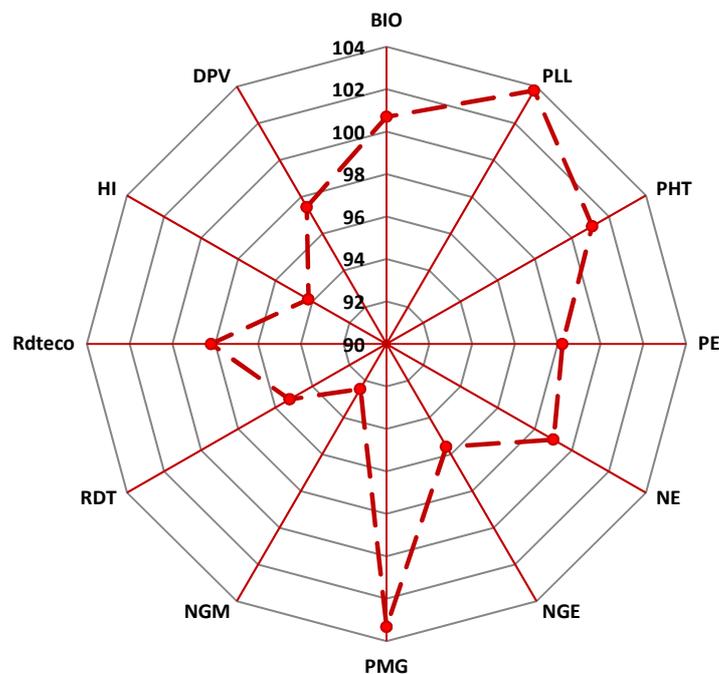


Figure 23. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées L relativement aux 20 lignées H ($100*L/H$), sélectionnées, en F3, sur la base de la durée de la phase végétative (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m^2 , RDT= rendement en grains, RDTéco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

La sélection, dans le sens de l'augmentation de la biomasse aérienne comme celle de l'augmentation du rendement en grains n'induisent de changement de la hauteur de la plante de la descendance, avec une augmentation de ce caractère 7.48 cm et une réduction de 4.6 cm pour ces deux caractères dans l'ordre cité (Tableau 22, Figure 24 et 25). En effet en comparant la réponse directe du rendement en grains (R_{RDT}) à la réponse corrélative du rendement en grains ($CR_{RDT/PHT}$) lorsque la sélection est faite sur la base de la biomasse aérienne, on note que l'efficacité de la sélection indirecte (RSE) est plus faible que la sélection directe prenant un taux de 53.29% (Tableau 22, Figure 24 et 25).

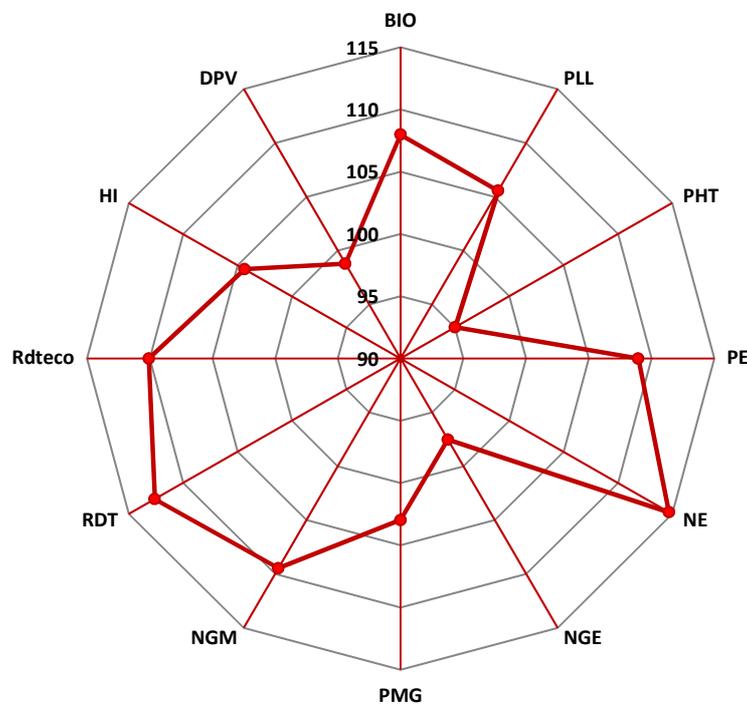


Figure 24. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L ($100 \cdot H/L$), sélectionnées, en F3, sur la base de la biomasse aérienne (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m^2 , RDT= rendement en grains, RDTeco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

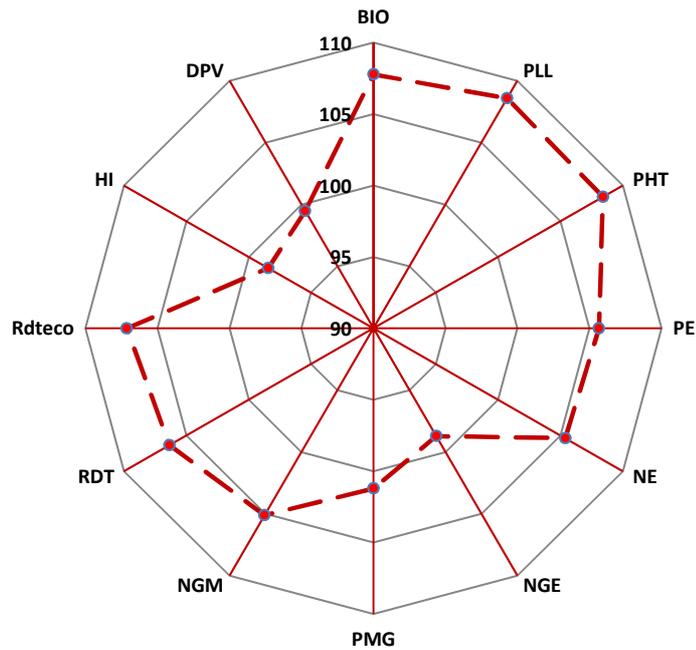


Figure 25. Variation des valeurs moyennes prises par les caractères mesurés en F4, chez les 20 lignées H relativement aux 20 lignées L ($100 \times H/L$), sélectionnées, en F3, sur la base du rendement en grains (BIO= Biomasse aérienne, PHT= Hauteur de la végétation, PE= poids des épis NE= nombre d'épis, NGE=nombre de grains par épi, PMG=poids de 1000 grains, NGM= Nombre de grains par m^2 , RDT= rendement en grains, RDTeco= rendement économique, IR=indice de récolte, DPV=durée de la phase végétative).

Quoique les différences ne sont pas significatives, la tendance indiquée par les résultats de la présente étude est que la sélection indirecte est relativement moins efficace que la sélection directe. Comparativement à ce qui est rapporté dans la littérature spécialisée, ces résultats vont dans le même sens que ceux de Havazvidi (1992) qui opérant une sélection sur la base du poids des épis, de la biomasse aérienne et de l'indice de récolte rapporte une réponse positive et significative avec un gain qui est plus élevé chez les sujets de paille haute que chez les lignées naines. Le gain est variable en valeur selon les populations soumises à la sélection. Ce même auteur rapporte que la sélection indirecte pour améliorer le rendement en grains utilisant le poids des épis ou la biomasse aérienne présentait une efficacité relative variable prenant des valeurs allant de 0.05 à 2.32 selon les populations et la hauteur de la fraction sélectionnée. Cet auteur mentionne que les

meilleures réponses corrélatives sont généralement observées chez les populations de haute taille (Havazvidi, 1992). Nizam Uddin et Marshall, (1989) obtiennent des gains variant de 7 à 14% en réponse à la sélection sur la base du poids des épis et sur la base de la biomasse aérienne.

Les travaux de Bensemene (2015) sur la sélection de l'orge indiquent du point de vue efficacité des caractères utilisés comme critères de sélection que la sélection du nombre d'épis retient 50% de lignées identifiées par la sélection directe contre 60% pour la biomasse aérienne et le nombre de grains par m², 70%, pour l'analyse en chemin et la sélection sur index et 80% pour l'analyse en composantes principales. Ces résultats suggèrent que la sélection indirecte, mono ou multi caractères, est moins efficace que la sélection directe pour améliorer le rendement en grains et que la sélection indirecte mono caractère est moins efficace que la sélection multi-caractères.

La faiblesse de la réponse à la sélection s'explique par la présence de l'interaction génotype x environnements et la ségrégation encore présente à l'intérieur du matériel évalué (F3-F4). Londero *et al.* (2000) mentionnent que c'est l'effet prononcé de l'environnement, et les interactions génotype x environnements, qui conduisent à des réponses directes et indirectes non significatives.

Sinebo *et al.*, (2002) mentionnent que la sélection indirecte est plus efficace aussi efficace et moins efficace que la sélection directe selon la variabilité du matériel étudié et l'effet du milieu. Nizam Uddin et Marshall, (1989) mentionnent que pour que la sélection indirecte soit plus efficace que la sélection directe est que l'héritabilité du caractère indirect soit plus élevée que celle du caractère à améliorer directement, et que la corrélation génotypique entre les deux caractères soit significative et élevée en valeur.

Conclusion et perspectives

L'objectif de la présente étude est d'évaluer la variabilité phénotypique créée par croisement chez les générations précoces F3 et F4., analyser les relations qui existent entre les caractères, estimer leurs effets directs et indirects et déterminer les critères de sélection qui peuvent engendrer des améliorations du rendement de blé dur sous conditions semi-arides.

Les résultats de l'analyse des données des générations F3 et F4 pour les caractères mesurés indiquent la présence d'une diversité appréciable au sein des populations de ces générations. Ceci est confirmé par les valeurs des coefficients de variation génotypique et phénotypique pour certain caractères. Le degré de détermination génétique au sens large, suggèrent qu'il y a une meilleure contribution du génotype à l'expression du phénotype pour la biomasse et le poids des épis en F3 qu'en F4, et une moindre contribution pour la paille produite.

Les coefficients de corrélations phénotypiques en F3 qu'en F4, suggèrent que la sélection de la biomasse aérienne devrait être efficace et amène des améliorations appréciables, dans le sens positif, chez au moins 6 caractères (paille, poids des épis, nombre d'épis, nombre de grains/m², rendement en grains et rendement économique) des 12 mesurés.

L'analyse des coefficients de corrélations de rang inter générations F3 et F4 des variables mesurées indique l'absence de ressemblance entre les générations pour la biomasse aérienne, la paille, le poids des épis, le nombre de grains par épi, le nombre de grains par m², le rendement en grains, et le rendement économique, dont les coefficients en sont pas statistiquement significatifs au seuil de 5%. Par contre il y a une meilleure ressemblance entre générations pour la hauteur de la végétation, le nombre d'épis par m², le poids de 1000 grains, l'indice de récolte, et la durée de la phase végétative.

Les résultats de la régression progressive et de l'analyse en chemin montrent que la biomasse, l'indice de récolte et le nombre d'épis et de grains/épi ont des effets directs positifs et élevés associés à des corrélations positives et significatives avec le rendement en grains. Ces caractéristiques sont suggérées comme des critères de sélection indirects pour améliorer le rendement des lignées évaluées par le biais de la sélection dans les générations futures de ce programme d'amélioration. Comme en F3, les résultats suggèrent qu'en F4, la sélection indirecte monocaractère pour améliorer le rendement risque de ne pas être efficace, suite au nombre élevé de variables déterminant ce caractère, et que la sélection sur index serait probablement plus efficace.

L'héritabilité au sens étroit de la biomasse aérienne, de la paille produite, du poids des épis, du nombre de grains par épi, du nombre de grains par m², du rendement en grains et économique est nulle. Ces résultats suggèrent que la variation observée chez ces différentes variables est plus d'origine environnementale que d'origine génétique et que la sélection en F3, sur la base de ces traits, serait peu efficace. Par contre la hauteur de la végétation, le nombre d'épis par m², le poids de 1000 grains, l'indice de récolte et la durée de la phase végétative présentent des h²ns significatives.

La différentielle de la sélection mesurée en F3, les réponses directes et corrélatives et l'héritabilité réalisée, observées en F4, indiquent que la sélection indirecte est relativement moins efficace que la sélection directe. La faiblesse de la réponse à la sélection s'explique par la présence de l'interaction génotype x environnements et la ségrégation encore présente à l'intérieur du matériel évalué (F3-F4).

En termes de perspective, nous pouvons suggérer d'approfondir l'étude et continuer à suivre les lignées qui ont montré des performances.

Il serait souhaitable d'incorporer les outils de la biotechnologie et du génie génétique dans les stratégies conventionnelles d'amélioration. Ces techniques réduiraient grandement les effets de l'interaction géotypes × environnement et elles offrent l'avantage d'une sélection efficace, rapide et précoce. L'étude génétique par la recherche de marqueurs moléculaires du mode de transmission et de l'héritabilité des caractères repérés, comme bons indicateurs de la tolérance au stress hydrique est nécessaire pour faciliter l'utilisation de ces caractères dans les programmes de sélection pour l'amélioration génétique.

REFERENCES

- Abbassenne F, Bouzerzour H, et Hachemi L. 1997. Phénologie et production du blé dur en zone semi-aride d'altitude. *Annales INA - El Harrach*, **18**: 24-36.
- Acevedo E, et Ceccarelli S. 1989. Role of a physiologist-bred in a breeding program for drought resistance conditions. In *drought resistance in cereals*, F.W.G. Baker (Ed), Wallingford, U.K, 117-119.
- Acquaah G. 2007. *Principals of plant genetics and breeding*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 569 p.
- Akcura M. 2011. The relationships of some traits in Turkish winter bread wheat landraces. *Turk J Agric For* **35**: 115-125.
- Ali IH, and Shakor EF. 2012. Heritability, variability, genetic correlation and path analysis for quantitative traits in durum and bread wheat under dry farming conditions. *Mesopotamia J. Agri.*, **40**: 27-39.
- Allard RW, and Bradshaw A.D. 1964. Implications of genotype environment interactions in applied plant breeding. *Crop Sci.*, **4**: 503-508.
- Allard RW. 1960. *Principles of plant breeding*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Ammar K. 2015. Enhancing the Sustainability of Global Durum Wheat Production. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.
- Annicchiarico P, Chiari T, Bellah F, Doucene S, Yallaoui-Yaici N, Bazzani F, Abdellaoui Z, Belloula B, Bouazza L, Bouremel L, Hamou M, Hazmoun T, Kelkouli M, Ould-Said H, and Zerargui H. 2002. Response of durum wheat cultivars to Algerian environments. II. Adaptive traits. *J. Agric. Environ. Int. Develop.*, **96**: 189-208.
- Annicchiarico P, Abdellaoui Z, Kelkouli M, and Zerargui H, 2005. Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi-dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *J. Afr. Sci.*, **143**: 57-64.
- Araus JL, Slafer GA, Reynolds MP, and Royo C. 2002. Plant breeding and water relations in C3 cereals. What should we breed for? *Ann. Botany*. **89** : 925-940.
- Arduini I, Masoni A, Ercoli L, and Mariotti M. 2006. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *European Journal of Agronomy*, **25**: 309-318.

- Bahlouli F, Bouzerzour H, Benmahammed A, and Hassous KL. 2005. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. Pak. J. Agron., **4**: 360-365.
- Barnabas B, Jager K, and Feher A .2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. Plant Cell. Environ., **31**: 11-38
- Belkherchouche H, Benbelkacem A, Bouzerzour H, and Benmahammed A. 2015. Flag leaf and awns ablation and spike shading effects on spike yield and kernel weight of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under rainfed conditions. Advances in Environmental Biology, **9**: 184- 191.
- Benbelkacem A, Saldi F, et Brinis L. 1993. La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. In «Option Méditerranéenne», Série A : séminaire de blé dur dans la région méditerranéenne. N°22 DIPONZO N., KAAAN F., NACHIT M., Ed. : CIHEAM. Espagne. 17-19 Novembre 1993. 271 pages.
- Bendjama A, Bouzerzour H, and Benbelkacem A. 2014. Adaptability of Durum Wheat Genotypes (*Triticum turgidum* L. Var *durum*) to Contrasted Locations. Aust. J. Basic & Appl. Sci., **8**(6): 390-396.
- Benmahammed A, Djekoun A, Bouzerzour H, and Cecarelli S, 2004. Response to F3 bi-directional selection for above ground biomass and its effect on grain yield in F4 to F7-generation of three barley (*Hordeum vulgare* L.) cross-populations. Al Awamia, **112**, **1**(4): 27-36.
- Benmahammed A, Bouzerzour H, Mekhlouf A, and Benbelkacem A. 2008. Variation de la teneur relative en eau, l'intégrité cellulaire, la biomasse et l'efficacité d'utilisation de l'eau des variétés de blé dur (*Triticum turgidum* var *durum* L.) conduites sous contrainte. Revue INRAA, **21**: 37-47.
- Benmahammed A, Kribaa M, Bouzerzour H, and Djekoun A. 2010. Assessment of stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semi arid conditions of the eastern high plateaus of Algeria. Euphytica, **172**: 383-394.
- Bensemmane L, Bouzerzour H, Benmahammed A, and Mimouni H. 2011. Assessment of the Phenotypic Variation Within Two- And Six-rowed Barley (*Hordeum Vulgare* L.) Breeding Lines Grown Under Semi-Arid Conditions. Advances in Environmental Biology, **5**(7): 1454-1460.
- Bensemmane L, 2015. Analyse de l'adaptation de l'orge (*Hordeom vulgare* L.) sous condition semi-arides. Thèse de doctorat en sciences, Fac. SNV, Université Ferhat Abbas Sétif-1, 133p
- Berger F, Grini PE, Schnittger and A. 2006. Endosperm: an integrator of seed growth and development. Current Opinion in Plant Biology, **9**: 664–670.

- Blum A, Zhang J, Nguyen HT. 1999. Consistent differences among wheat cultivars in osmotic adjustment and their relationship to plant production. *FCR*, **64**: 287-291.
- Bonjean A, et Picard E. 1990. Les céréales à pailles. Origine, histoire, économie et sélection. Softword ed. 205p.
- Bouzerzour H, and Benmahammed A. 1994. Environmental Factors limiting Barley Yield in the High Plateaux of Eastern Algeria. *Rachis, ICARDA* , **12**: 14-19.
- Bouzerzour H, and Dekhili M. 1995. Heritabilities, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Res.*, **41**: 173-178.
- Bouzerzour H. 1998. Sélection pour le rendement en grain, la précocité, la biomasse aérienne et l'indice de récolte chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi- aride. Thèse Doctorat d'Etat, I.S.N, Université Mentouri. Constantine. Algérie
- Bouzerzour H, Djekoun A, Benmahammed A, et Hassous L. 1998. Contribution de la biomasse aérienne, de l'indice de récolte et de la précocité à l'épiaison au rendement en grain de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-arides d'altitude. *Cahiers d'Agriculture*, **8**: 133-137.
- Bouzerzour H, Adjabi A, Benmahammed A, Hadj Sahraoui A, et Harkati N. 2002. Production et adaptation comparée des variétés de céréales en zone semi-aride d'altitude. *Céréaliculture*, **37**(1): 4-13.
- Calderini DF, Dreccer MF, and Slafer GA. 1995. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. a re-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breed.*, **114**: 108-112.
- Ceccarelli S, Grando S, and Hamblin J. 1992. Relationships between barley grain yield measured in low and high yielding environments . *Euphytica*, **64**:49- 58.
- Ceccarelli S, Grando S, and Impiglia A. 1998. Choice of selection strategy in breeding for stress environments. *Euphytica*, **103**: 307-318.
- Ceccarelli S, Grando S, Maatougui M, Michael M, Slash M, Haghparast R, Rahmanian M, Taheri A, Al-Yassin A, Benbelkacem A, Labdi M, Mimoun H, and Nachit M. 2010. Plant breeding and climate changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, **148**: 627–637.
- Chaves M, Maroco J, and Pereira J. 2003. Understanding plant responses to drought: from genes to whole plant. *Fonctionnal Plant Biology*, **30**: 239-264
- Chennafi H, Aïdaoui A, Bouzerzour H, and Saci A. 2006. Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci.*, **5**: 854-860.

- Chennafi H, Saci A, Harkati N, Adjabi A, et Mébarkia A. 2011. L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi- aride. In: Bouzerzour H., Irekti H. & Vadon B. Quatrièmes rencontres méditerranéennes du semis direct. Options méditerranéennes. Série A.: Séminaires Méditerranéens **96**: 213:220. Ed. CIHEAM , Paris, 251 p
- CIC, 2014. Conseil International des Céréales. Chiffres du 26/06/2014. <http://www.agpb.com/documentation-et-publications/recoltes/160-monde-donnees-globales-et-par-pays-sur-le-marche-des-cereales>.
- Clarke JM. 2005. Durum wheat improvement in Canada. In: Royo C, Nachit MM, DiFonzo N, Araus JL, Pfeiffer WH, Slafer GA (eds.) Durum wheat breeding. Current approaches and future strategies, **2**: 921-938.
- Cox, TS. and Frey KJ. 1984. Genetic variation for grain yield and related traits in sorghum introgression populations. Theoretical and Applied Genetics, **68**, 145–53. *CropStat 7.2 for Windows Tutorial Manual 2009*. Crop Research Informatics Laboratory. International Rice Research Institute. pp, 379.
- Dabi A, Mekbib F, and Desalegn T. 2016. Estimation of genetic and phenotypic correlation coefficients and path analysis of yield and yield contributing traits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. International Journal of Natural Resource Ecology and Management. **4**: 145-154.
- El-Morshidy MA, Kheiralla KA, Ali MA, and Ahmed AAS. 2010. Efficiency of pedigree selection for earliness and grain yield in two wheat populations under water stress conditions. Assiut J. Agric. Sci., **37**: 77-94.
- Falconer DS, 1981. Introduction to Quantitative Genetics, 2nd Edn. Longman, London and New yourk., 340 p .
- Falconer DS, and Mackay TFC. 1996. Introduction to Quantitative Genetics. Longman, Essex, 4th ed. Edition, UK.
- FAO. 2013. www.fao.org.
- Faostat. 2005. Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
- Feldmann M. 2001. Origin of cultivated wheat. Pp.3 - 56. In A. P. Bonjean and W. J. Angus (Eds.). The world wheat book. A history of wheat breeding. Lavoisier Publishing, France.
- Fellah A, Benmahammed A, Djeoun A, et Bouzerzour H. 2002. 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**: 161-170.

- Fellahi Z, Hannachi A, Bouzerzour H, and Boutekrabort A. 2013a. Correlation between traits and path analysis coefficient for grain yield and other quantitative traits in Bread Wheat under semi-arid conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability*, **3**: 16-26.
- Fellahi Z, Hannachi A, Guendouz A, Bouzerzour H, and Boutekrabort A. 2013b. Genetic variability, heritability and association studies in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, **4**: 1161-1166.
- Fellahi Z, Hannachi A, Bouzerzour H, and Benbelkacem A. 2016. Inheritance Pattern of Metric Characters Affecting Grain Yield in Two Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Crosses Under Rainfed Conditions. *Jordan Journal of Biological Sciences*, **8**: 175-181.
- Fellahi Z. 2017. Analyse génétique d'un croisement Line x Tester et réponse à la sélection du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous conditions semi-arides. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Université de Sétif-1, 240 pages.
- Gelalcha S, and Hanchinal RR. 2013. Correlation and path analysis in yield and yield components in spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under irrigated conditions in Southern India. *African J. Agri. Res.*, **8**: 3186-3192
- Gill S, Bhullar GS, and Mohol GS. 1979. Combining ability in durum wheat (*Triticum durum* Desf). *Crop Improvement*, **6**: 30-35.
- Haddad L. 2016. Analyses AMMI et GGE de l'interaction génotype x milieux du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) et identification des facteurs explicatifs de l'interaction. Thèse de doctorat en sciences université de Sétif-1. 150 pages.
- Haddad L, Bouzerzour H, Benmahammed A, Zerargui H, Hannachi A, Bachir A, Salmi M, Oulmi A, Fellahi Z, Nouar H, and Laala Z. 2016. Analysis of genotype × environment interaction for grain yield in early and late sowing date on Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences*, **9**: 139-146.
- Hamli S, Labhilili M, kadi K, Kabthan AEH, Tagouti M, Kanzeri R, Alyadini M, and Bouzerzour H. 2015. Heat shock effects on fluorescence, membrane stability, chlorophyll content and metabolites accumulation in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) seedlings and relationships with stress tolerance indices. *Advances in Environmental Biology*, **6**:116-125.
- Hammer O, Harper DAT, and Ryan PD, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**: 9.

- Hannachi A, Fellahi Z, Bouzerzour H, and Boutekrabort A. 2013a. Correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*Triticum durum* Desf) under rainfed conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability*, **3**:122-131.
- Hannachi A, Fellahi Z, Bouzerzour H, and Boutekrabort A. 2013b. Diallel-cross analysis of grain yield and stress tolerance-related traits under semi-arid v conditions in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Electronic Journal of Plant Breeding*. **4(1)**: 1027-1033.
- Hannachi A. 2013. Analyse diallèle de quelques caractères associés à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Mémoire de Magister, Faculté des Sciences Agronomiques et biologiques, Département d'Agronomie. Université Saad Dahlab, Blida, Algérie, 100 pages.
- Hannachi A. 2017. Aptitude à la combinaison, sélection mono et multi caractères et adaptabilité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions semi- arides. Thèse doctorat des sciences, Faculté des Sciences de la nature et de la vie, Université Ferhat Abbas Sétif1, 177 pages.
- Hanson H, Borlaug NE, and Anderson RG. 1982. *Wheat in the third world*. Boulder, CO, USA, West views Press.
- Harris D, Tripathi RS, and Joshi A. 2002. On-farm seed priming to improve crop establishment and yield in dry direct-seeded rice, in: Pandey S., Mortimer M., Wade L., Tuong T.P., Lopes K., Hardy B. (Eds.), *Direct seeding: Research Strategies and Opportunities*, International Research Institute, Manila, Philippines, pp. 231-240.
- Havazvidi EK. 1992. The effect of growth regulators on lodging, development and grain yield of tall spring wheat in Zimbabwe. Seventh regional wheat workshop for Eastern, Central and Southern Africa held at Mexico by CIMMYT. PP: 369-375.
- Hussain M, Malik MA, Farooq M, Ashraf MY, and Cheema MA. 2008. Improving drought tolerance by exogenous application of glycine-bétaïne and salicylic acid in sunflower. *J. Agron. Crop Sci.*, **194**: 193-199.
- Jilal A. 2011. Assessment of genetically diverse international barley germplasm for development of food product applications. PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. Australia, 204 pages.
- Kamara AY, Menkir A, Badu-apraku B, and Ibikunle O. 2003. The influence of drought stress on growth, yield and yield components of selected maize genotypes. *J. Agric. Sci.*, **141**: 43-50.
- Kimber G. and Sears ER. 1987. Evolution in the genus *Triticum* and the origin of cultivated wheat. Pp. 154-164; *In* Heyne, E.G. (ed.), *Wheat and wheat improvement*, ed. Madison.

- Kirby EJM, Appleyard M, and Fellows G, 1982. Effects of sowing date and varieties on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley plant. *Agronomie*, **5**: 117-126.
- Kribaa M, Hallaire S, and Curmi J, 2001. Effects of tillage methods on soil hydraulic conductivity and durum wheat grain yield in semi-arid area. *Soil and Tillage*, **37**: 17-28.
- Kumar CVS, Sreelakshmi CH, and Shivani D. 2012. Selection indices for yield in rabi sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, **3**: 1002-1004.
- Laala Z, 2010. Analyse en chemin des relations entre le rendement en grains et les composantes chez des populations F3 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) Sous conditions semi-arides. Mémoire magister, Faculté des Sciences de la Nature et de la vie, Université Ferhat Abass Sétif (UFAS), 96 pages.
- LazStats 2013. Free Statistics Programs and Materials by W.G. Miller.
- Levitt J. 1982. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York. 632 pages
- Mandal AB, and Sarkar KK. 1996. Variability in bread wheat under foot hill soil zone. *Environment and Ecology*, **14**: 528-530.
- Martin SK, and Futi X. 2000. Genetic gain in early stages of a soybean breeding program. *Crop Sci.*, **40**:1559-1564.
- Martin SK, and Geraldi IO. 2002. Comparison of Three Procedures for Early Generation Testing of Soybean *Crop Sci.*, **42**:705-709.
- Mc Neal FH, Qualset GQ, Baldrige DE, and Stewart VR. 1978. Selection for yield and yield components in wheat. *Crop. Sci.*, **18**: 145-152.
- Mecha B, Alamerew S, Assefa A, Dutamo D, and Assefa E. 2017. Correlation and path coefficient studies of yield and yield associated traits in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Adv. Plants Agric. Res.*, **6**: 2-12.
- Mekhlouf A, Bouzerzour H, Benmahammed A, et Hadj Sahraoui A, 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride ; Sécheresse, **17**: 507-513.
- Menad A, Meziani N, Bouzerzour H, and Benmahammed A, 2011. Analyse de l'interaction génotype x milieu du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) : application des modèles AMMi et la régression conjointe. *Nature & Technology (Université Chlef)*, **2**: 99-106.

- Meziani N, Bouzerzour H, Benmahammed A, and Menad A, 2011. Performance And Adaptation of Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to Diverse Locations. *Advances in Environmental Biology*, **5(7)**: 1465-147.
- Meziani N. 2016. Analyse génétique des caractères physiologiques liés au rendement en conditions de stress hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). thèse de doctorat en Sciences agronomiques. ENSA El Harrach, Alger, 130 pages.
- Monneveux P. 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver ? In CHALABI, DEMARLY Y., Eds. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Tunis: AUPELF UREF, JOHN LIBBEY EUROTTEXT, **1991**: 165-186.
- Moragues M, Garcí'a del Moral LF, Moralejo M, and Royo C. 2006. Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin II: Biomass production and allocation. *Field Crops Res.* **95**: 182-193
- Mühleisen J, Reif JC, Maurer HP, Möhring J, and Piepho HP. 2013. Visual scorings of drought stress intensity as covariates for improved variety trial analysis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **199**: 321-330.
- Mühleisen J. 2015. Differences in yield performance and yield stability between hybrids and inbred lines of wheat, barley, and triticale. PhD thesis, University of Hohenheim, Stuttgart .130 pages
- Nachit MM, and Jarrah M, 1986. Association of some morphological characters to grain yield in durum wheat under Mediterranean dry-land conditions. *Rachis*, **5**: 33 -34.
- Nasr K. 1994. Etude comparative du rendement en grains et des composantes du rendement sous différents modes de semis et de régimes hydriques chez quinze variétés de blé dur .Mémoire d'Ingénieur- université Mentouri.
- Nizam Uddin M. and Marshall D.R. 1989. Effects of dwarfing genes on yield and yield components under irrigated and rainfed conditions in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, **42**: 127-134.
- Nouar H, Haddad L, Laala Z, Oulmi A, Zerargui H, Benmahammed A, et Bouzerzour H. 2010. Performances comparées des variétés de blé dur : Mohammed Ben Bachir, Waha et Bouselam dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture*, **54**: 23-28.
- Nouar H, Bouzerzour H, Haddad I, Menad A, Hazmoune T, and Zerargui H. 2012. Genotype × environment interaction assessment in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) using AMMI and GGE models. *Advances Environmental Biology*, **6**: 3007-3015.

- Okuyama LA, Federizzi LC, and Neto JF. 2004. Correlation and path analysis of yield and yield components and plants traits in wheat *Ciencia Rural*, Santa Maria, **6**: 1701-1708.
- Oulmi A, Benmahammed A, Laala Z, Adjabi A, and Bouzerzour H. 2014. Phenotypic Variability and Relations between the Morpho-Physiological Traits of three F5 Populations of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Evaluated Under Semi-Arid Conditions. *Advances in Environmental Biology*, **8(21)**: 436-443.
- Peymaninia Y, Valizadeh M, Shahryari R, Ahmadizadeh M, Habibpour M. 2012. Relationship among morpho-physiological traits in bread wheat against drought stress at presence of a leonardite derived humic fertilizer under greenhouse condition. *Int. Res .J. Appl. Basic Sci.*, **3(4)**: 822-830.
- Picard E. 1988. Sélection du blé. L'intégration des Biotechnologies/ 48-58.
- Praba ML, Cairns JE, Babu RC, Lafitte HR. 2009. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. *J. Agron. Crop Sci.*, **195**: 30-46.
- Ranieri R. 2015. Geography of the durum wheat crop. *Pastaria international* 6/2015. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.
- Rastoin JL, et Benabderrazik EL. 2014. Céréales et oléagineux au Maghreb. Document de l'Institut de prospective économique du monde méditerranéen (Ipemed). 136 pages.
- Reynolds MP, Rajaram S, Sayre KD. 1999. Physiological and genetic changes of irrigated wheat in the post-Green Revolution period and approaches for meeting projected global demand, *Crop Science*, **39**: 1611-1621.
- Reynolds MP, Calderini DF, Condon AG, Rajaram S. 2001. Physiological basis of yield gains in wheat associated with the Lr19 translocation from *Agropyron elongatum*, *Euphytica* . **119**: 137-141.
- Reynolds M, Dreccer F, and Trethowan R. 2007. Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces, *Journal of Experimental Botany*, **58**: 177-186.
- Reynolds M, and Tuberosa R. 2008. Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments, *Current Opinion in Plant Biology*, **11**: 171-179.
- Reynolds M, Bonnett D, Chapman SC, Furbank RT, Mane`s Y, Mather DE, Parry MAJ. 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *Journal of Experimental Botany*, **62**: 439-452.
- Reynolds M, Foulkes J, Furbank R, Griffiths S, King J, Murchie M, Parry E, and Slafer G. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell. Environ.*, **35**: 1799-1823

- Richards RA, Rebetzky GJ, Condon AG, and Van Herwaar-Den AF. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.*, **42** :111-121.
- Salmi, M, Haddad L, Oulmi A, Benbelkacem A, et Benmahammed A. 2015. Variabilité phénotypique et sélection des caractères agronomiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *European Scientific Journal*, **11(21)**: 99-111.
- Sanchez García M. 2013. Genetic gains and changes in the pattern of adaptation of bread wheat varieties grown in Spain during the 20th century. PhD Thesis, Lleida University, <http://hdl.handle.net/10803/109262>.
- Sayar R, Benammar F, et Bensalem M. 1992. Analyse de la stabilité du rendement du blé en Tunisie in «tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes». Diversité génétique et amélioration variétale. Montpellier (France) 15-17. Déc.1992. Ed. INRA. Paris 1993. , Colloque, **64**:127-137.
- Sayre KD, Rajaram S, Fischer and RA. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico, *Crop Sciences*, **37**: 36-42.
- Sharp RE, Poroyko V, Hejlek LG, Spollen WG, Springer GK, Bohnert HJ, and Nguyen HT. 2004. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. *J. Exp. Bot.*, **55**: 2343-2351.
- Simmonds NW. 1986. Principles of crop improvement. Longman eds., Singapore. 370 p.
- Simmond NN. 1991. Selection for local adaptation in a plant breeding program. *Theor. Appl. Gen.*82 : 363-367. Ed. technique et documentation. Lavoisier. Paris. 147 pages.
- Sinebo W, Gretzmacher R, and Edelbauer A. 2002. Environment of selection for grain yield in low fertilizer input barley. *Field Crops Research*, **74**:151-162.
- Slafer GA, and Araus JL. 2007. Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of environments,. in *Scale and Complexity in Plant Systems Research* (Wageningen UR Frontis Series, Vol. 21) eds Spiertz J. H. J., Struik P. C., van Laar H. H., editors. (Dordrecht: Springer), 147-156
- Smith JD, and KINMAN ML. 1965. The use of parent-offspring regression as an estimator of heritability. *Crop Sci.* 5: 595-596.
- Subhashchandra B, Lohithaswa HC, Desais SA, Hanchinal RR, Kalappanavar IK, Math KK, and Salimath PM. 2009. Assessment of genetic variability and relationship between genetic diversity and transgressive segregation in tetraploid wheat. *Karnataka J. Agric. Sci.*, **22**: 36-38.

- Tardieu F, Cruziat P, Durand JL, Triboï E, et Zivy M. 2007. ESCo «sécheresse et agriculture». In Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, pp 242-2577
- Tarekegne A, Gebeyehu G, Tanner DG, and Geleta B. 1996. Trends in bread wheat yield improvement in Ethiopia from 1967 to 1994. In: D.G. Tanner, T.S. Payner, and O.S Abdalla(ed.) The 9th Regional Wheat Workshop for Eastern, Central and Southern Africa. CIMMYT, Addis Ababa, Ethiopia. Pp.333-337.
- Trethowan RM, Van Ginkel M, and Rajaram S. 2002. Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global drought affect environments. *Crop Sci.*, **42**: 1441-1446.
- Voltas J, Lopez-Corcoles H, and Borrás G. 2005. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. *Eur. J. Agron* **22**: 309-324.
- Zahid A. 2010. Mécanismes cellulaires et moléculaires régissant le métabolisme des semences de céréales : Rôle du réseau rédoxines- Système antioxydant dans la prédiction de la qualité germinative, Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, Pp 60.
- Zhao HB, Chu LY, Jaleel CA, Manivannan P, Panneerselvam R, and Shao MA. 2009. Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants-biotechnologically and sustainably improving agriculture and the eco environment in arid regions of the globe. *Crit. Rev. Biotechnol.*, **29**: 131-151.

ANNEX :

Tableau Annex1. Moyennes décennales (2006-2015) de la production (tonnes) et du rendement à l'hectare (tonne/ha) du blé dur des principaux pays producteurs (Ammar, 2015).

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

* Kingdom of Saudi Arabia



Response to F3 Selection for Grain Yield in Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) Thell. ssp. *turgidum* conv. *durum* (Desf.) Mac Key] under South Mediterranean Conditions

**Zahira Laala¹, Amar Benmahammed², Abdelmalek Oulmi²,
Zine El Abidine Fellahi^{3*} and Hamenna Bouzerzour²**

¹Valorization of Natural Biological Resources Laboratory (VNBR Lab), Department of Agronomy, Faculty of Natural and Life Sciences, University of Ferhat Abbas Setif-1, Setif, 19000, Algeria.

²Valorization of Natural Biological Resources Laboratory (VNBR Lab), Department of Ecology and Plant Biology, Faculty of Natural and Life Sciences, University of Ferhat Abbas Setif-1, Setif, 19000, Algeria.

³Department of Agronomy, Faculty of Natural, Life and Earth Sciences and the Universe, University of Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 34030, Algeria.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration between all authors. These authors contributed equally to this paper. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/ARRB/2017/37923

Editor(s):

- (1) Paola Angelini, Department of Applied Biology, University of Perugia, Perugia, Italy.
(2) George Pery, Dean and Professor of Biology, University of Texas at San Antonio, USA.

Reviewers:

- (1) Nebi Bilir, Suleyman Demirel University, Turkey.
(2) Manasi Dash, Orissa University of Agriculture and Technology, India.
(3) Lwanga Charles Kasozi, University of KwaZulu-Natal, South Africa.
(4) Bojan Stipešević, University of J. J. Strossmayer in Osijek, Croatia.

Complete Peer review History: <http://www.sciencedomain.org/review-history/22357>

Original Research Article

Received 1st November 2017
Accepted 4th December 2017
Published 19th December 2017

ABSTRACT

An experiment was carried out at the Field Crop Institute, Agricultural Research Station of Setif (ITGC-ARS, Setif, Algeria), to assess the response to early generation selection in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Results indicated the presence of sufficient variability to warrant selection. Correlation coefficients of biological yield, plant height, spike number, kernels per spike, harvest index and days to heading with grain yield were significant. Path analysis emphasized the direct

*Corresponding author: E-mail: zinou.agro@gmail.com

and indirect effects of biomass yield, spike number and harvest index on grain yield, suggesting that F3-selection based on one or simultaneously on all these traits would result in significant direct and correlated responses. However, intergeneration correlation and parent-offspring regression coefficients predicted that F3-selection based on biomass yield, spike number, harvest index, 1000-kernel weight and grain yield will be ineffective while plant height and days to heading selection will be efficient. Direct and correlated responses to F3-selection for biomass yield, spike number, harvest index, 1000-kernel weight, plant height, days to heading and grain yield confirmed predictions drawn from intergeneration correlation and parent-offspring regression coefficients. Inefficiency of F3-selection was attributed to genotype x environment interaction. The overall results suggested that early generation selection should be restricted to plant height and days to heading while selection to improve grain yield directly or via related traits should be delayed to later advanced generation.

Keywords: *Triticum durum*; F3 selection; path analysis; intergeneration correlation; parent-offspring regression; response; realized heritability.

1. INTRODUCTION

Durum wheat breeders are interested in developing high yielding and stable varieties. Selection of such desirable genotypes starts in early generation or is delayed when progenies are nearly homozygous in advanced generations. In early stages of breeding programs, direct estimates of yield are quite difficult and according to [1], selection practiced is mostly unsuccessful owing to heterozygosity, confounding effects of dominance and epistatic gene action, large environmental variation, and inability to evaluate genotypes x environment interaction. Selection for yield components appeared to be more effective, if selected traits are highly heritable across environments and highly correlated with grain yield [2]. Knott and Talukdar [3] suggested that wheat yield could be increased by selecting for kernel weight. Rasmusson and Cannell [4] reported that barley selection for number of heads resulted in changes in yield similar to those brought by selection for yield itself. Indirect selection has been shown to be more efficient, less efficient, or equally efficient compared to direct selection when selection was practiced to improve a trait in one environment by selecting the trait in another environment [5]. Efficiency of indirect selection compared to direct selection depends on the heritability of the trait used as selection criterion and on correlation between this trait and the indirectly targeted trait [6,7]. Investigation of association between yield and secondary traits and correlation coefficient partitioning into direct and indirect effects through path analysis are useful to provide a realistic picture of the relationships between dependent and independent variables [8,9,10]. The objectives of this study were to analyze variability, to compute correlations coefficients, to

partition these coefficients into direct and indirect effects, to estimate heritability and to investigate direct and indirect responses in F4 generation to F3 divergent selection for yield and yield components in durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) *Thell. ssp. turgidum conv. durum* (Desf.) Mac Key], under south Mediterranean conditions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Site, Plant Material and Experimental Design

The experiment was conducted at the Field Crop Institute Agricultural Research Station of Setif (ITGC-ARS, Setif, 36°12' N, 5°24' E, 1023 masl) during the 2008/09 and 2009/10 cropping seasons. The experimental material included the four parental varieties (Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha and Mrb₅) and their 330 F3 and F4 segregating lines, developed by pedigree method. Ofanto is an Italian cultivar [11], Waha and Mrb₅ are cultivars selected from Icarda-Cimmyt durum wheat breeding program. Mohammed Ben Bachir (MBB) is a variety selected from a land race widely grown in the Algerian eastern high plateaus [12]. F3 and F4 lines were grown in 2-row plots 5.00 m long with 0.20 m inter rows space, between the parents which were repeated four times. Seeding was done in November, adopting a seeding rate of 200 kernels/m². Rainfall accumulated during 2008/09 and 2009/10 cropping cycles was 369.8 and 502.4 mm, respectively.

2.2 Measurements

The following traits were measured *on per* plot basis. Heading date (DHE, days) was estimated as number of calendar days from January first to

the date when 50% the spikes were half ways out from flag leaf. Plant height (PHT, cm) was measured from the soil surface to the top of the spike, awns excluded. Above ground biomass (BIO, g/m²) was estimated from a harvested area of 1 m long x 0.20 cm inter-row spacing, which served also to obtain the number of spikes (SN, /m²). Grain yield (GY, g/m²) was estimated from a harvested area of one row 5 m long x 0.20 cm inter-row spacing. 1000-kernel weight (TKW, g) was derived from the count and weight of 250-kernel. Harvest index (HI, %) was estimated by the ratio between grain yield and above ground biomass. Number of kernels per spike (KS) was derived from estimated values of grain yield, number of spikes and 1000-kernel weight.

2.3 Data Analysis

Descriptive statistics were used to obtain mean, range and variances for the measured traits. Means separation was based on least significant difference (LSD_{5%}) determined from the analysis of variance of the replicated parents. Phenotypic (CVp), and genotypic coefficients of variation (CVg) were calculated to assess trait variability. Relationships between traits within generation and among generations for a given trait were investigated using Sperman's rang correlation coefficients and regression of F4 on F3 generation. Path analysis was used to identify traits having strong direct effect on grain yield. Broad sense heritability was determined from the variance components, while narrow sense heritability was derived from the regression coefficient of the F4 progenies on their F3 parents, corrected for the degree of inbreeding, as reported by Smith and Kinman [13]. Realized heritability (h²real) was calculated as ratio of selection response (Rs) to selection differential (S) according to Acquaah [14]. Selection

differential was calculated as difference between the means of 5% of high and 5% low selected F3 lines. Selection response was estimated as difference between the means of the 5% high and 5% low progenies (F4) of the F3-selected lines, according to Prasad et al. [15]. Direct response to selection (Rs) is the genetic improvement of a trait in response to selection upon that trait itself, whereas correlated response (CRs) is the genetic improvement of a trait in response to selection of an inherently associated trait [6]. Statistical analyses were carried out using subroutines implemented in Cropstat 7.2.3 [16], Past [17], and Lazstats [18] softwares.

3. RESULTS

3.1 Traits Variability and Heritability in the F3 Generation

Mean and range values, least significant difference, phenotypic and genotypic coefficients of variation and broad sense heritability of the studied traits in the F3 generation are reported in Table 1. Compared with the least significant difference, significant differences existed between maximal and minimal values for the measured traits, suggesting the possibilities to make significant changes through selection.

Traits that showed higher phenotypic and genotypic variation (CVp and CVg > 20.0%) were above ground biomass, spike number, and grain yield. Plant height, kernels per spike, 1000-kernel weight and harvest index showed intermediate level of variability (10.0% < CVp and CVg < 20.0%). Heading date expressed the lowest variability level with CVp and CVg of 1.1 and 1.0%, respectively (Table 1). Based on broad

Table 1. Mean and range values, least significant difference, phenotypic and genotypic coefficients of variation and broad sense heritability of the studied traits of the F3 generation (n = 330)

	Mean	Range	LSD _{5%}	CVp	CVg	h ² bs
BIO (g/m ²)	398.6	202.0 - 860.0	38.9	30.9	27.6	80.0
PHT (cm)	90.1	56.0 - 133.0	2.6	19.8	19.4	95.6
SN (/m ²)	99.7	49.0 - 219.0	10.9	31.1	26.9	75.1
KS	35.4	18.9 - 55.8	2.2	17.7	15.1	73.3
TKW (g)	38.8	26.7 - 55.6	0.89	12.4	11.9	92.9
GY (g/m ²)	133.2	61.0 - 260.2	11.8	29.5	26.7	81.9
HI (%)	34.1	18.0 - 49.3	2.2	16.7	14.0	70.3
DHE (days)	130.3	128.0 - 135.0	0.36	1.1	1.0	86.8

BIO = above ground biomass, PHT = plant height, SN = spikes number, KS = kernels per spike, TKW = 1000-kernel weight, GY = grain yield, HI = harvest index, DHE = number of calendar days to heading

sense heritability (h^2_{bs}) estimates, plant height and 1000-kernel weight were classified as highly heritable ($h^2_{bs} > 90.0\%$). Heritability values of the remaining traits were intermediate, varying from 70.3% for harvest index to 86.8% for days to heading (Table 1).

3.2 Traits Relationship

Traits relationship analysis indicated that the highest and significant values of Sperman's rank correlations were observed between above ground biomass and spike number (0.829**) and between above ground biomass and grain yield (0.843**). Moderate and significant correlation coefficients were found between plant height and 1000-kernel weight (0.532**), between grain yield and spikes number (0.777**) and between kernels per spike and harvest index (0.618**). The remaining correlation coefficients were weak even though significant or weak statistical significance (Table 2).

Days to heading showed weak and significant negative correlation coefficient with 1000-kernel weight (-0.134*), grain yield (-0.180*) and harvest index (-0.213**), and non-significant correlations coefficients with the other measured traits. These results suggested that earliness is somewhat advantageous for expression of these three characters; while high above ground biomass and spike number were advantageous for expression of high grain yield and high kernels per spike favored harvest index expression (Table 2). So to improve indirectly grain yield, above ground biomass and spike number are possible paths, while indirect improvement of harvest index should be targeted through improvement of spike fertility. Path analysis results indicated that the positive and highly significant correlation coefficient, relating above ground biomass to grain yield (0.843**), was made of sizeable direct effect of above ground biomass (0.744), plus a positive and strong indirect effect via spike number and a negative and weak indirect effect (-0.128) via harvest index. Plant height showed no direct effect but moderate indirect effects, positive via above ground biomass (0.248) and negative via harvest index (-0.144, Table 3).

The high and significant correlation coefficient relating grain yield to spike number (0.777**) was made of a moderate direct effect (0.309) and a high indirect effect via above ground biomass (0.617). Number of kernels per spike presented a

low direct effect (0.196) associated with a moderate and positive indirect effect via harvest index (0.242). The non-significant correlation coefficient relating 1000-kernel weight to grain yield was made of a low direct effect (0.121) and no sizeable indirect effects via the other traits (Table 3). Correlation coefficient relating grain yield to harvest index was made of sizeable positive direct (0.392), a positive indirect effect via number of kernels per spike (0.121) and a negative indirect effect via above ground biomass (-0.299). Direct or indirect effects of days to heading on grain yield were too weak and appear to be of little interest in selection within the studied plant material (Table 3). Path analysis results suggested that above ground biomass, spike number, harvest index and plant height are of interest due to their direct and indirect effects on grain yield. These traits should be considered in the selection scheme to improve grain yield.

3.3 Inter-Generation Correlation and Parents-Offspring Regression

Effectiveness of early generation selection depends on the breeder's ability to distinguish differences between genotypes in early generation and the persistence of these differences in later generations. According to Bhatt [19], a high inter-generation correlation is a basic requirement for early generation selection efficiency. In the present study above ground biomass, number of kernels per spike, and grain yield showed non-significant inter-generation correlation coefficients. Plant height, spike number, 1000-kernel weight, harvest index and days to heading showed significant inter-generation correlation coefficients (Table 4).

A significant inter-generation correlation coefficient is suggestive of little or no change in the rank order of line performances from one generation to the next. On the contrary a non-significant correlation coefficient suggests that line performances ranking change from one generation to another. Such trait, measured in two generations, behaves as two completely different traits, mainly if the generations are confounded with environments. The lack of persistence of the ranking order of the lines, between generations, for above biomass, number of kernels per spike and grain yield was also suggested by the non-significant regression coefficients and low narrow sense heritability values (Table 4). Only plant height and days to

heading had moderate narrow sense heritability, which suggested that early generation selection on the basis of these traits could be effective.

3.4 Selection Response

Compared to the least significant difference ($Lsd_{5\%}$), selection differential values were large enough to warrant effective selection response. In fact, differences between the 05% high and 05% low F3 selected lines were 420.94 g/m² for above ground biomass, -55.538 cm for plant height, 99.61 spikes/m² for spike number, 14.72 g for 1000-kernel weight, 134.92 g/m² for grain yield, 18.62% for harvest index and 4.25 days for days to heading (Table 5).

F3 selection based on above ground biomass, spike number, 1000-kernel weight, grain yield and harvest index was not effective, since the direct response (difference between the 05% high and 05% low F3 selected lines in the F4 generation was not significant. F3 selection based on above ground biomass caused significant correlated responses of plant height

(7.48 cm) and days to heading (-0.6 days). F3 selection based on spike number reduced significantly plant height (-4.77 cm), while 1000-kernel weight selection increased significantly plant height (30.08 cm) and days to heading (1.70 days). Grain yield selection reduced significantly both plant height (-4.60 cm) and days to heading (-1.40 days). Similarly harvest index based selection induced significant decrease in plant height (-18.08 cm) and days to heading (-2.90 days). Direct response to F3 selection based on plant height and on days to heading was significant, since plant height expressed 30.36 cm decrease and days to heading showed 3.00 days increase. Correlated responses to selection based on these two characters were non-significant (Table 5). Realized heritability was low for above ground biomass (0.05), spike number (0.17), 1000-kernel weight (0.14), grain yield (0.10) and harvest index (0.14) but high for plant height (0.55) and days to heading (0.71). These results confirmed the expectations suggested from the intergeneration correlation coefficients and the parent-offspring regressions analysis.

Table 2. Sperman's correlation coefficients between the measured traits in the F3 generation (n = 330, probabilities above diagonal, and correlation coefficients below diagonal)

	BIO	PHT	SN	KS	TKW	GY	HI	DHE
BIO		0.000	0.000	0.102	0.157	0.000	0.000	0.281
PHT	0.333		0.155	0.000	0.000	0.002	0.000	0.113
SN	0.829	0.078		0.000	0.000	0.000	0.000	0.108
KS	-0.090	-0.254	-0.227		0.000	0.000	0.000	0.310
TKW	0.078	0.532	-0.251	-0.242		0.788	0.017	0.015
GY	0.843	0.166	0.777	0.265	0.015		0.021	0.001
HI	-0.402	-0.367	-0.195	0.618	-0.131	0.128		0.000
DHE	-0.060	-0.087	-0.089	-0.056	-0.134	-0.180	-0.213	

BIO = above ground biomass, PHT = plant height, SN = spikes number, KS = kernels per spike, TKW = 1000-kernel weight, GY = grain yield, HI = harvest index, DHE = number of calendar days to heading

Table 3. Direct (bold figures) and indirect effects of the measured traits on F3 generation grain yield (n = 330)

	BIO	PHT	SN	KS	TKW	HI	DHE	ri/GY
BIO	0.744	0.008	0.256	-0.018	0.009	-0.158	0.000	0.843**
PHT	0.248	0.024	0.024	-0.050	0.064	-0.144	0.000	0.166**
SN	0.617	0.002	0.309	-0.044	-0.030	-0.077	0.000	0.777**
KS	-0.067	-0.006	-0.070	0.196	-0.029	0.242	0.000	0.265**
TKW	0.058	0.013	-0.077	-0.047	0.121	-0.051	-0.001	0.015ns
HI	-0.299	-0.009	-0.060	0.121	-0.016	0.392	-0.001	0.128*
DHE	-0.044	-0.002	-0.027	-0.011	-0.016	-0.083	0.004	-0.180**

BIO = above ground biomass, PHT = plant height, SN = spikes number, KS = kernels per spike, TKW = 1000-kernel weight, GY = grain yield, HI = harvest index, DHE = number of calendar days to heading

Table 4. Inter-generation Spearman's correlation coefficient (rs), coefficient of regression (b) of F4 on F3, and narrow sense heritability (h²ns) of the measured traits

Trait	BIO	PHT	SN	KS	TKW	GY	HI	DHE
rs	0.042	0.769	0.194	0.024	0.211	0.092	0.193	0.432
Prob	0.598	0.000	0.015	0.765	0.008	0.248	0.015	0.000
b	0.039	0.613	0.156	0.040	0.174	0.067	0.142	1.000
SE _b	0.048	0.040	0.069	0.064	0.057	0.063	0.044	0.001
t _{obs}	0.818	15.227	2.252	0.621	3.058	1.077	3.227	9438.859
Prob.>t	0.415	0.000	0.026	0.536	0.003	0.283	0.037	0.000
h ² ns	0.022	0.350	0.089	0.023	0.099	0.038	0.081	0.571

BIO = above ground biomass, PHT = plant height, SN = spikes number, KS = kernels per spike, TKW = 1000-kernel weight, GY = grain yield, HI = harvest index, DHE = number of calendar days to heading

Table 5. Selection differential (S) in F3, responses direct (R) and correlative (CR) and realized heritability in F4 for traits used as selection criteria in F3-generation

	BIO	PHT	SN	KS	TKW	GY	HI	DHE
S _{F3}	420.94							
R/CR _{F4}	22.9	7.48	5.1	-0.32	0.56	6.83	-0.57	-0.6
h ² real	0.05							
S _{F3}		-55.38						
R/CR _{F4}	-16.48	-30.36	11.61	-0.36	-2.46	4.64	2.96	0.01
h ² real		0.55						
S _{F3}			99.61					
R/CR _{F4}	23.79	-4.77	16.90	-2.42	-0.37	5.03	-0.99	-1.05
h ² real			0.17					
S _{F3}					14.72			
R/CR _{F4}	-4.65	30.08	-16.70	2.11	2.00	-7.89	-1.56	1.70
h ² real					0.14			
S _{F3}						134.92		
R/CR _{F4}	23.50	-4.60	13.50	-0.60	1.40	12.8	1.50	-1.40
h ² real						0.10		
S _{F3}							18.62	
R/CR _{F4}	-11.54	-18.08	11.20	-1.80	1.31	4.83	2.59	-2.90
h ² real							0.14	
S _{F3}								4.25
R/CR _{F4}	-2.08	-1.08	0.90	1.17	-1.49	5.12	2.10	3.00
h ² real								0.71
Lsd5% _{F3}	38.90	2.60	10.90	2.20	0.89	11.80	2.20	0.36
Lsd5% _{F4}	92.60	3.90	31.00	3.50	2.80	42.90	4.20	1.40
F4-mean	317.38	93.30	99.32	25.62	46.39	115.67	36.37	115.06

BIO = above ground biomass, PHT = plant height, SN = spikes number, KS = kernels per spike, TKW = 1000-kernel weight, GY = grain yield, HI = harvest index, DHE = number of calendar days to heading

4. DISCUSSION

High variability (CV_p > 20.0%) was observed in F3 generation for above ground biomass, spike number, and grain yield. Intermediate variability (10.0% < CV_p < 20.0%) was noted for plant height, kernels per spike, 1000-kernel weight and harvest index. Days to heading exhibited low variability. Broad sense heritability estimates were higher than 70.3% for the studied traits. The presence of high variability coupled to high broad sense heritability estimates suggested that F3-selection should be effective. These results

compared fairly well with those reported under similar conditions by Fellahi et al. [20]. These authors reported phenotypic coefficient of variation values of 1.55% for days to heading, 11.40% for harvest index, 12.66% for 1000-kernel weight, 12.82% for plant height, 17.5% for number of kernels per spike, 29.21% for spike number and 28.45% for grain yield.

Results of trait relationships analysis indicated that above ground biomass was highly correlated with spike number and with grain yield. Moderate correlation coefficients existed between plant

height and 1000-kernel weight, between grain yield and spike number and between kernels per spike and harvest index. Days to heading had weak negative correlations with 1000-kernel weight, grain yield and harvest index. Earliness appeared to be advantageous. High above ground biomass and spike number were needed for best expression of grain yield while high kernels per spike contributed positively to harvest index expression. These results suggested that grain yield could be improved indirectly via above ground biomass and spike number. Improvement of harvest index should be targeted through spike fertility selection. In this context Singh et al. [21] found that grain yield was significantly and positively correlated with 1000-kernel weight and negatively with plant height. Similar association was observed by Tambe et al. [22] for 1000-kernel weight and grain yield while Hannachi et al. [23] as well as Ali and Shakor [8] reported that grain yield showed positive and significant correlation with above ground biomass and number of spikes. Hannachi et al. [23] noted also that harvest index showed negative and significant correlation with plant height and with 1000-kernel weight, and positive and significant correlation with number of kernels per spike. Mollasadeghi and Shahryari [24] reported a negative correlation between harvest index and plant height. Singh [25] reported significant and positive correlation coefficients of grains per spike, tiller number and biological yield with grain yield in F₂ generation, suggesting that selection based on one or simultaneously on all three yield components would result into high grain yield. Mansouri et al. [26] investigated the relationships among agronomic traits and grain yield in 56 genotypes of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Their results indicated that above ground biomass, harvest index and spike number were the most grain yield influencing traits, suggesting that selection should be carried out preferentially for these traits to accumulate favorable alleles in the selected entries for future uses.

Path analysis results indicated that above ground biomass affected grain yield directly and via spike number. Plant height acted indirectly on grain yield, positively via above ground biomass and negative via harvest index. Spike number acted directly and indirectly via above ground biomass. 1000-kernel weight had weak direct effect on grain and non-significant indirect effects via the other yield components. Harvest index affected positively grain yield via kernel number per spike and negatively via above ground biomass. Path analysis results emphasized the

role of above ground biomass, spike number, harvest index and plant height which should be considered in selection to improve grain yield. Hannachi et al. [23] reported similar results, they found that above ground biomass and harvest index exerted positive direct effect on grain yield, and that the highest indirect effects on grain yield were engendered by spike number, plant height, and 1000-kernel weight through above ground biomass. Baranwal et al. [27] found that 1000-kernel weight exhibited high positive direct effect on grain yield. Singh et al. [21] reported high positive direct effect of 1000-kernel weight, harvest index and above ground biomass on grain yield, but plant height had negative direct effect. This suggested that these characters should be given more weightage in breeding program.

Results of inter-generation correlations and parent-offspring regression coefficients analysis indicated that above ground biomass, number of kernels per spike and grain yield lack ranking persistence between generations. They had non-significant regression coefficients and low narrow sense heritability values, while plant height and days to heading had moderate narrow sense heritability, significant intergeneration correlations and regression coefficients which make them useful and efficient early generation selection criteria. Similar results were reported by Barman and Borah [28] who found no relation between yield of F₂ selection and mean yield of their corresponding F₃ families, whose intergeneration correlation coefficient and parent-offspring regression were non-significant, suggesting that early generation yield based selection will be ineffective. Conversely, plant height and days to flowering showed strong correlation and regression coefficients between F₂-F₃ and between F₃-F₄ generations, suggesting the effectiveness of early generation selection for these characters [28]. Singh [25] mentioned that the identification of traits for early generation selection following correlation and regression approach was inefficient, and found that correlation coefficients of grain yield of F₄ progenies with grain yield of parent F₂ plants were not significant, making prediction in early generation difficult.

Results of the present study indicated that F₃-selection differential values for above ground biomass, plant height, spike number, 1000-kernel weight, grain yield, harvest index and days to heading were large enough to warrant effective selection response. However, F₄-response to F₃-selection based on above ground biomass,

spike number, 1000-kernel weight, grain yield and harvest index was not significant (Fig. 1). Above ground biomass F3-selection increased indirectly plant height and decreased the number of days to heading of the progenies (Fig. 2). Spike number F3-selection reduced significantly plant height, while 1000-kernel weight F3-selection increased significantly plant height and days to head. Grain yield F3-selection reduced significant both plant height and days to heading. Similarly harvest index based F3-selection induced significant decrease in plant height and

days to head. Direct response to plant height and to days to heading F3-selection was significant, with non-significant correlated responses (Figs. 3, 4).

Realized heritability was low for above ground biomass, spike number, 1000-kernel weight, grain yield and harvest index but high for plant height and days to heading. These results confirmed the expectations suggested from the intergeneration correlation coefficients and the parent-offspring regressions analyses. These

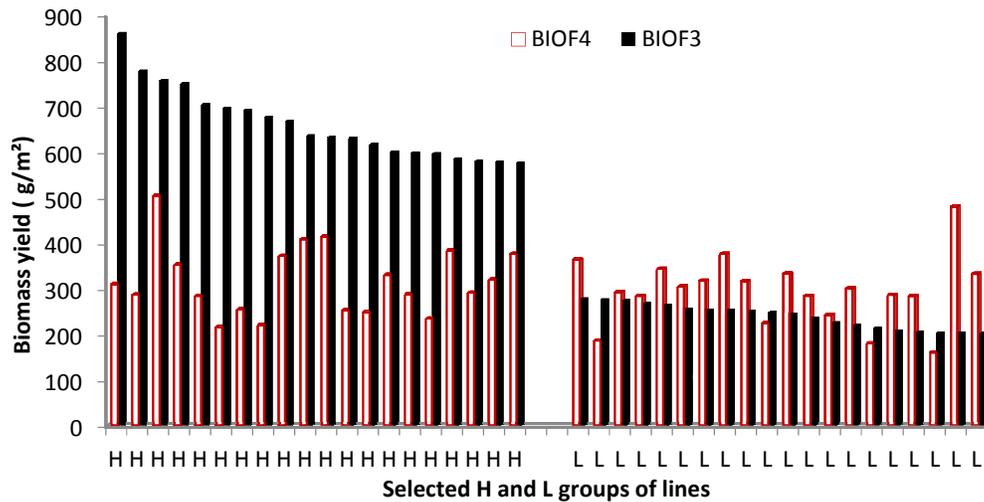


Fig. 1. Above ground biomass selection differential and response to F3-selection

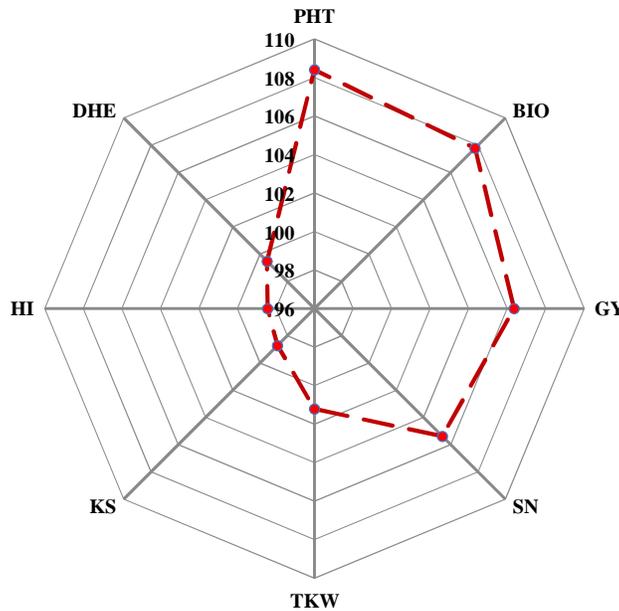


Fig. 2. Above ground biomass direct and correlated responses to F3-selection for (values of H group of lines expressed as % of the values of L group of lines)

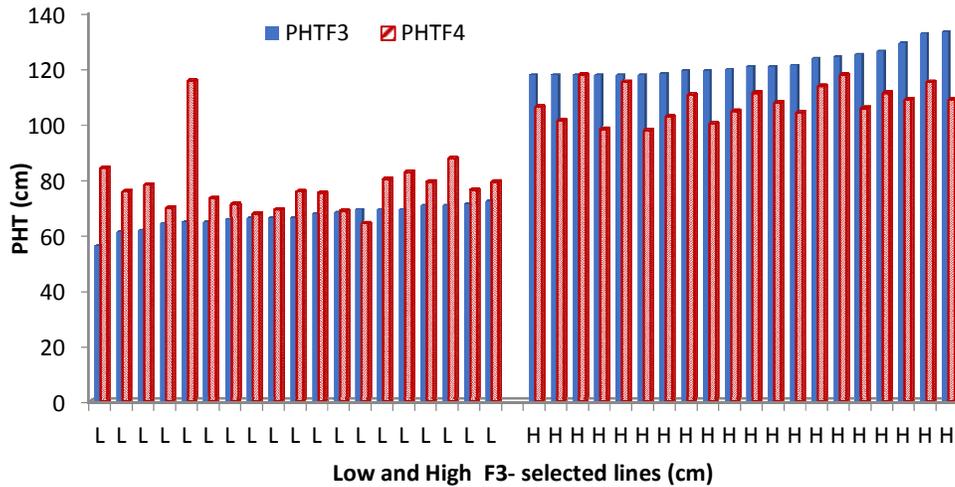


Fig. 3. Plant height selection differential and response to F3-selection

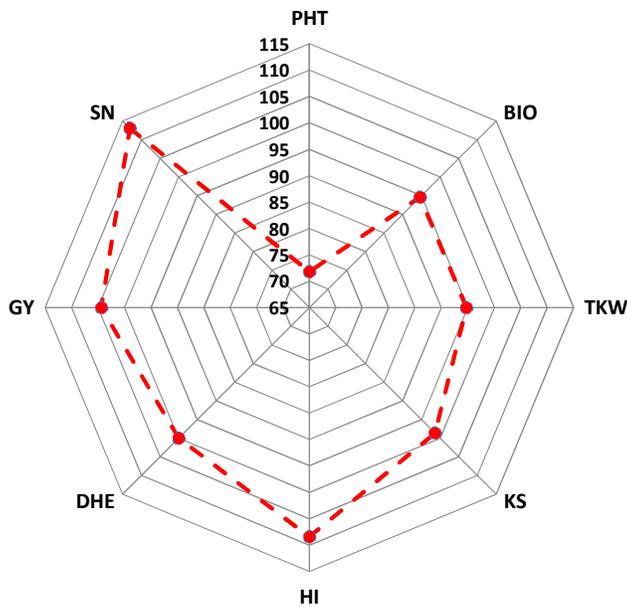


Fig. 4. Plant height direct and correlated responses to F3-selection (values of L group of lines expressed as % of the values of H group of lines)

results corroborated findings of Singh and Balyan [29] who reported that plant height showed effective selection in the early generation while harvest index, grain yield and above ground biomass were ineffective. Alexander et al. [30] reported that selection of plant height was effective in F3 and F4 generations.

The objective of most wheat breeding programs aimed to enhance grain yield genetic potential.

Careful choice of parents to generate useful genetic variability and effective early generation selection are important steps leading to the development of superior yielding genotypes. Effective early generation selection depends on the presence of sufficient genetic variability, selection intensity, traits association and heritability. Early generation selection, using grain yield as criterion, has been reported to be ineffective, because of the relationships between

yield and yield components are often affected by the environment. Rahman and Bahl [31] mentioned that harvest index based selection to improve indirectly grain yield was no more effective than direct selection for yield. This ineffectiveness is due to the presence of genotype x environment interaction that decreased the reliability of the selection criterion. The presence of genotype x environment (G x E) explained the ineffectiveness of early generation selection practiced in the present study (based on biomass yield, spike number, 1000-kernel weight, harvest index and grain yield), since selected F3-plant materials were compared with their F4-progenies in different years. The presence of G x E is suggested by the lack of persistence of the observed differences between F3-selected high and low group of lines in the F4-generation. Plant height and days to heading were less sensitive to G x E, since F4 progenies of the F3-selected high and low group of lines retained their parental characteristics as predicted by the F3-F4 intergeneration correlation and parent-offspring regression coefficient.

5. CONCLUSION

The results of this study indicated that grain yield biomass yield, spike number, 1000-kernel weight and harvest index exhibited significant genotype x environment interaction, which makes them less reliable as early generation selection criteria to improve direct grain yield. However, plant height and days to heading were less prone to genotype x environment interaction which makes them good early generation selection criteria. Under these growth conditions segregating material should be early generation selected for plant height and days to heading, while selection for other traits highly correlated with grain yield and for grain yield itself should be delayed to advanced generations, and practiced on multi-sites and multi-years basis.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was undertaken as a part of the project CNEPRU N° F01220140023 titled 'Variability, genetic determinism and selection of cereals under semi-arid conditions of the Algerian eastern high plains', financed by the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research. Special thanks are extended to the personnel of the ITGC-ARS for providing seeds, helping in trials management and data collection, particularly to Mr Fayçal Djekhaba, Hocine Zerargui and Abdelkrim Hadj Sahraoui.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Knott DR. Effects for selection for F2-plant yield on subsequent generations in wheat. *Can. J. Plant Sci.* 1972;52:721-726.
2. Fischer KS, Fukai S, Kumar A, Leung H, Jongdee B. Field phenotyping strategies and breeding for adaptation of rice to drought. *Front. Physiol.* 2012;3:282-291.
3. Knott DR, Talukder B. Increasing seed weight in wheat and its effect on yield, yield components, and quality. *Crop Sci.* 1971;11:280-283.
4. Rasmusson DC, Cannell RO. Selection for grain yield and components of yield in Barley. *Crop Sci.* 1970;10:51-54.
5. Sinebo W, Gretzmacher R, Edelbauer A. Environment of selection for grain yield in low fertilizer input in barley. *Field Crops Res.* 2002;74:151-162.
6. Falconer DS, Mackey FC. Introduction to quantitative genetics. Fourth Edition. Longman. New York; 1996.
7. Hannachi A, Fellahi Z, Rabti B, Guendouz A, Bouzerzour H. Combining ability and gene action estimates for some yield attributes in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *J. Fund. Applied Sci.* 2017;9(3):1519-1534.
8. Ali IH, Shakor EF. Heritability, variability, genetic correlation and path analysis for quantitative traits in durum and bread wheat under dry farming conditions. *Mesopotamia J. Agri.* 2012;40:27-39.
9. Oulmi A, Salmi M, Laala Z, Fellahi Z, Adjabi A, Rabti A, Benmahammed A. Morpho-physiological variability studies in F6 populations of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) evaluated under semi-arid Mediterranean conditions. *Adv. Environ. Biol.* 2016;10(3):161-170.
10. Fellahi Z, Hannachi A, Ferras K, Oulmi A, Boutalbi W, Bouzerzour H, Benmahammed A. Analysis of the phenotypic variability of twenty F3 biparental populations of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) evaluated under semi-arid. *J. Fund. Applied Sci.* 2017;9(1):102-118.
11. 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.* 2005;45:1741-1749.
12. Belkharouch H, Benbelkacem A, Bouzerzour H, Benmahammed A. Flag leaf and awns ablation and spike shading effects on spike yield and kernel weight of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under rainfed conditions. *Adv. Environ. Biol.* 2015;9:184-191.
 13. Smith JD, Kinman ML. The use of parent-offspring regression as an estimator of heritability. *Crop Sci.* 1965;5:595-596.
 14. Acquaah G. Principles of plant genetics and breeding. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 2007;584.
 15. Prasad B, Carver BF, Stone ML, Babar MA, Raun WR, Klatt AR. Genetic analysis of indirect selection for winter wheat grain yield using spectral reflectance indices. *Crop Sci.* 2007;47:1416-1425.
 16. Cropstat 7.3.2. Software package for windows. International Rice Research Institute, IRRI, Manila; 2007.
 17. Hammer O, Harper DAT, Ryan PD. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica.* 2001;4:1-9.
 18. LazStats, Free Statistics Programs and Materials by W.G. Miller; 2013.
 19. Bhatt GM. Early generation selection criteria for yield in wheat. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 1980;46:14-22.
 20. Fellahi Z, Hannachi A, Guendouz A, Bouzerzour H, Boutekrabt A. Genetic variability, heritability and association studies in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Elect. J. Plant Breed.* 2013;4:1161-1166.
 21. Singh K, Punia MS, Singh V. Inter-relationship between grain yield and its component characters in F2 generation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Curr. Advan. Res.* 2016;5:749-751.
 22. Tambe A, Mehta DR, Chovatia VP, Bhatiya VJ. Genetic variability, character association and path coefficient analysis in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Elect. J. Plant Breed.* 2013;4:1303-1308.
 23. Hannachi A, Fellahi Z, Bouzerzour H, Boutekrabt A. Correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under rainfed conditions. *J. Agric. Sustain.* 2013;3:122-131.
 24. Mollasadeghi V, Shahryari R. Important morphological markers for improvement of yield in bread wheat. *Adv. Environ. Biol.* 2011;5:538-542.
 25. Singh T. Evaluation of empirical and predictive approach of selection for yield improvement in wheat. *J. Plant Sci. Res.* 2015;2:135-141.
 26. Mansouri A, Bouzerzour H, Oudjehih B, Benbelkacem A. Variation and relationships among agronomic traits in durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) *Thell. ssp. turgidum* conv. *durum* (Desf.) MacKey] under south Mediterranean growth conditions: Stepwise and path analyses. Submitted to *J. Fund. Applied Sci.*; 2017.
Available:<http://www.jfas.info>
 27. Baranwal DK, Mishra VK, Vishwakarma MK, Yadav PS, Arun B. Studies on genetic variability, correlation and path analysis for yield and yield contributing traits in wheat (*T. aestivum* L. em Thell.). *Plant Arch.* 2012;12:99-104.
 28. Barman D, Borah SP. Effect of selection response on F3 and F4 generation for yield and yield component characters in mutant rice strain (*Oryza sativa* L.). *APCBEE Procedia.* 2012;4:183-187.
 29. Singh T, Balyan HS. Relative efficiency of various single plant selection criteria and F3-generation yield testing in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian J. Genet.* 2003;63:24-29.
 30. Alexander WL, Smith EL, Dhanasobhan C. A comparison of yield and yield component selection in wheat. *Euphytica.* 1984;33: 953-961.
 31. Rahman MA, Bahl PN. Evaluation of early generation testing in chickpea. *Plant Breed.* 1986;82-85.

© 2017 Laala et al.; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Peer-review history:
The peer review history for this paper can be accessed here:
<http://sciencedomain.org/review-history/22357>

أجريت هذه الدراسة على مستوى محطة الأبحاث الزراعية للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى (ITGC) خلال الموسمين الزراعيين 2010/2009، 2011/2010. لمتابعة الجيلين الثالث F3 والرابع F4 والمتمثلة في ثلاث هجن من القمح الصلب ناتجة عن تصالب الأصناف أفونتو، محمد بن بشير، واحه، وأم الربيع. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التغيرات الضاهرية والوراثية للجيلين مع تحديد العلاقات الموجودة بين الصفات، والتأثيرات المباشرة والغير مباشرة و تحديد معايير الانتخاب التي تسمح بتحسين المردود الحبي في الظروف الشبه الجافة. تشير النتائج إلى وجود تباين في الصفات المدروسة وهذا يدل على إمكانية تحسين الخصائص المرغوبة. أظهرت الدراسة وجود تباين وراثي كبير عند الجيلين F3 / F4، وهذا ما تؤكد قيم معاملات التباين الظاهري والوراثي. بينت نتائج الإنحدار التأثير المباشر العالي والإيجابي بالإضافة إلى الإرتباطات المعنوية والإيجابية للكتلة الحيوية، مؤشر عدد السنابل، وعدد الحب في السنبله مع المردود الحبي. كما بينت دراسة الإرتباطات للمتغيرات المقاسة عند الجيلين الثالث والرابع بأن الصفات الأكثر تأثيرا على المردود الحبي هي كل من المردود الاقتصادي، الكتلة الحيوية، عدد ووزن السنابل. أظهر الانتخاب الغير المباشر للجيل الرابع محدوديته في تحسين المردود نظرا لوجود عدد كبير من المتغيرات المرتبطة به وأيضا لتأثير التفاعل نمط وراثي x بيئة. وفي هذه الحالة يصبح الانتخاب عن طريق إستعمال المؤشر أكثر فعالية.

الكلمات المفتاحية: قمح صلب، تغير، التحليل التخطيبي، شبه جاف.

Résumé : La présente étude a été conduite au niveau de la Station Expérimentale Agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif au cours des deux campagnes agricole 2009/2010, 2010/2011. L'expérimentation porte sur le suivi des générations F₃ et F₄ provenant de trois croisements réalisés entre les variétés Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha et Mrb₅. L'objectif de la présente étude est d'évaluer la variabilité phénotypique créée par croisement chez les générations précoces F₃ et F₄, analyser les relations qui existent entre les caractères, estimer leurs effets directs et indirects et déterminer les critères de sélection qui peuvent engendrer des améliorations du rendement de blé dur sous conditions semi-arides. Les résultats indiquent la présence de la variabilité pour les caractères étudiés. Ce qui suggère les possibilités d'améliorer les caractères d'intérêt. Les valeurs élevées de l'héritabilité au sens large prises par certains caractères suggèrent qu'il existe des possibilités efficaces de sélection, et qu'ils sont intéressants pour la sélection. Les variances phénotypiques et génotypiques significatives ont été observées en F₃ et F₄, ceci est confirmé par les valeurs des CVP et CVG. Les résultats de la régression progressive et de l'analyse en chemin montrent que la biomasse, l'indice de récolte et le nombre d'épis et de grains/épi ont des effets directs positifs et élevés associés à des corrélations positives et significatives avec le rendement en grains. L'analyse des corrélations entre les variables mesurées de la génération F₃ qu'en F₄ suggère que les caractères influençant le plus le rendement en grains, le nombre de grains par m² et le rendement économiques, la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis. Les résultats suggèrent qu'en F₄, la sélection indirecte monocaractère pour améliorer le rendement risque de ne pas être efficace, suite au nombre élevé de variables déterminant ce caractère, la présence de l'interaction génotype x environnements, la ségrégation encore présente à l'intérieur du matériel évalué (F₃-F₄), et que la sélection sur index serait probablement plus efficace.

Mots clés : Blé dur- sélection- variabilité- analyse en chemin- semi-aride.

Abstract : The present study was conducted at the Field Crop Institute, Agricultural Experimental Station of Setif (ARS-ITGC) during 2010/11 and 2011/12 cropping seasons. The experimental material included the F₃ and F₄ generations derived from crosses made between Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha and Mrb₅ varieties. The objective was to assess the phenotypic variability in early generations, analyze the relationships existed between the traits, estimate their direct and indirect effects and determine the selection criteria that can generate improvements in durum wheat yields under semi-arid conditions. The results indicated the presence of sufficient variability among the studied traits, suggesting the possibilities to improvements. The high values of the broad-sense heritability for some traits suggest that there are effective selection possibilities, and these traits are interesting for selection. Significant phenotypic and genotypic variances were observed in F₃ and F₄, this result was confirmed by the PCV and GCV values. The results of the stepwise regression and path analysis showed that the biomass, the harvest index, the number of spikes and the number of grains/spike had positive and high direct effects associated with positive and significant correlations with the grain yield. The analysis of correlations between the measured variables of the F₃ and F₄ generations suggested that the number of grains per m², the economic yield, the above-ground biomass, the number of spikes and the spikes weight were the most grain yield influencing traits. These results suggest that the indirect single-trait selection to improve yield may not be effective in F₄, due to the large number of variables determining this trait, the presence of the genotype x environments interaction and the segregation present in the evaluated material (F₃-F₄). The selection based-index could be more effective.

Key words: Durum wheat- selection- variability- path analysis-semi-arid.