

Variabilité génétique, héritabilité et corrélations entre les caractères phéno-morpho-physiologiques et agronomiques des populations F₂ de blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Abdelmalek Oulmi¹, Nadjim Semcheddine², Zine El Abidine Fellahi², Manel Salmi², Zahira Laala², Aboubakr Rabti²,
and Amar Benmahammed¹

¹Département de Biologie et d'Ecologie Végétale, Fac. Sci. Nat. Vie, Laboratoire VRBN,
Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algeria

²Département d'Agronomie, Fac. Sci. Nat. Vie, Laboratoire VRBN,
Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algeria

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work was carried out at the Field Crop Institute-Agricultural Experimental Station of Setif (Algeria) during the 2008/2009 cropping season. The objective was to evaluate some pheno-morpho-physiological and agronomic traits in five durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties and F₂ segregating lines. The results indicate the presence of a good amount of variability for the measured traits. Low relationships between wheat productivity and the physiological traits is found, which makes them less effective as selection criteria in the case of this study. However, the above-ground biomass measured at maturity stage seems to be the determinant factor in grain yield expression. High heritability associated with high coefficients of phenotypic and genotypic variation values, along with high genetic gain are recorded for the above-ground biomass and spikes weight per plant, suggesting that early selection based on these traits would be effective to improve the stress tolerance and enhance the productivity of the F₂ studied populations.

KEYWORDS: Abiotic Stress, Semi-Arid, Yield, Selection, *Triticum durum*.

RESUME: Ce travail a été réalisé durant la campagne agricole 2008/2009 sur le site expérimental de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, (Algérie). L'objectif visé est l'évaluation de certains caractères phéno-morpho-physiologiques et agronomiques chez cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) et des lignées F₂ en ségrégation. Les résultats obtenus indiquent la présence d'une bonne variabilité pour les caractères mesurés. Les résultats ont fait ressortir une faible liaison entre la productivité et les caractères physiologiques, ce qui les rend peu efficaces comme critères de sélection dans le cas de la présente étude. En revanche, la biomasse aérienne mesurée à maturité semble le facteur déterminant du rendement en grain. De fortes valeurs de l'héritabilité associées à des valeurs élevées des coefficients de variation phénotypique et génotypique, et du gain attendu de la sélection pour la biomasse aérienne et le poids des épis par plante, suggérant que la sélection précoce sur la base de ces deux caractères semble efficace pour améliorer la tolérance aux stress et la productivité des populations F₂ étudiées.

MOTS-CLEFS: Stress Abiotiques, Semi-Aride, Rendement, Sélection, *Triticum durum*.

1 INTRODUCTION

La sélection du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les régions à fortes contraintes abiotiques a fait peu de progrès du point de vue amélioration de la productivité et de la tolérance [1], [2]. Les difficultés résident dans l'identification et la

caractérisation des paramètres liés à la résistance aux différentes contraintes climatiques à travers l'observation et la mesure d'un caractère aussi complexe que variable qui est le rendement en grain [3]. Divers processus phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques sont à l'origine des stratégies d'évitement, d'esquive et de tolérance de sorte que pour chaque environnement, il est nécessaire de déterminer la stratégie qui soit à même de réduire de la variation de la production en améliorant les capacités de défense de la plante sous contraintes [4], [5].

Les approches physiologiques sont recommandées pour sélectionner dans les environnements variables [3], [6]. Ceci nécessite tout d'abord la compréhension des mécanismes qui contrôlent l'adaptation des génotypes aux stress abiotiques. Les difficultés liées à cette recherche résident dans le grand nombre de facteurs qui conditionnent l'adaptation [7], [8]. La sélection pour la tolérance induit la baisse des rendements sous contrainte, mais cette baisse est moins importante chez les génotypes tolérants comparativement à celle notée chez les génotypes sensibles [9]. La recherche d'indicateurs d'une meilleure utilisation de l'eau par la plante tels que le statut hydrique foliaire, la tolérance à la dessiccation, l'assimilation nette, l'accumulation des osmolytes compatibles et la croissance relative, sous stress est un préalable nécessaire pour avancer en matière d'amélioration du rendement sous contraintes abiotiques [2].

Ce travail a pour objet l'étude des divergences phéno-morpho-physiologiques chez plusieurs variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) ainsi que le suivi et l'évaluation des populations F₂, issues des croisements entre ces génotypes et ce dans les conditions climatiques semi-arides.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIMENTATION ET NOTATIONS

Le matériel végétal de la présente recherche est constitué de cinq lignées parentales et des populations F₂ issues des croisements entre ces lignées ainsi qu'une variété témoin à savoir Bousselam. Les parents sont : Ofanto, Waha, Mrb₅, Korifla et Mohammed Ben Bachir. Bousselam est caractérisée par ses performances et son adaptation au climat semi-aride des hautes plaines Sétifiennes. Les populations F₂ issues des quatre croisements : Ofanto/Mohammed Ben Bachir (OF/MBB), Ofanto/Waha (OF/WA), Ofanto/Mrb₅ (OF/MRB) et Ofanto/Korifla (OF/KOR) ont été semées, le 9 décembre 2008, sur le site expérimental de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif (Algérie) dans des rangs de 5 m de long par 20 cm d'écartement entre rangs successifs. Pour chaque croisement, 10 rangs ont été semés, avec un espacement de 10 cm entre graines (plantes). Les lignées parentales ont été semées sur 3 rangs de mêmes dimensions au début et à la fin de chaque croisement et dans un dispositif en blocs complètement randomisé à trois répétitions (parcelle de 6 m²) avec une densité de 250 graines/m².

Les mesures ont porté sur la surface de la feuille étendard (SF) qui a été mesurée, au stade épiaison, sur un échantillon de 10 feuilles étendards prises au hasard. La surface moyenne a été estimée par le produit [9] :

$$SF \text{ (cm}^2\text{)} = 0.607 \text{ (L x l)}$$

Où : L = longueur moyenne de la feuille (cm), l = largeur moyenne de la feuille (cm) et 0.607 = coefficient de régression de la surface estimée à partir du papier grammage sur celle déduite par le produit (L x l).

Le poids spécifique foliaire (PSF) a été calculé par le rapport du poids de la matière sèche (PS) sur la surface de la feuille étendard (SF) :

$$PSF \text{ (mg/cm}^2\text{)} = PS \text{ (mg)} / SF \text{ (cm}^2\text{)}$$

La teneur relative en eau (TRE) a été déterminée, au stade épiaison, sur un échantillon de 10 feuilles. Les feuilles échantillonnées par génotype sont directement pesées pour avoir le poids frais (PF). Elles sont ensuite mises dans un tube à essai contenant de l'eau distillée, à l'abri de la lumière à la température ambiante du laboratoire, pour atteindre l'état turgide, 4 heures après, elles sont pesées, après avoir pris soin de les essuyer de l'excès d'eau avec du papier buvard, pour obtenir le poids turgide (PT). L'échantillon de feuilles est mis à sécher dans une étuve à 65°C pendant 16 heures pour obtenir le poids sec (PS). La teneur relative en eau est calculée par :

$$TRE \text{ (\%)} = 100 \text{ (PF - PS)} / \text{(PT - PS)}$$

Le test de l'intégrité cellulaire (% dommages cellulaires) est effectué sur les deux dernières feuilles entièrement développées. Deux feuilles sont prises au hasard par génotype. Ces échantillons sont lavés à l'eau courante. Les feuilles sont découpées en morceaux de 1 cm de long. Un échantillon de 10 morceaux du limbe foliaire est mis dans un tube à essai et lavé avec de l'eau distillée pour enlever les poussières adhérentes qui affectent éventuellement sur les résultats du test. Trois

tubes sont utilisés par génotype et traitement. Dans chaque tube, on ajoute 10 ml d'eau distillée déminéralisée les tubes ainsi traités sont périodiquement agités manuellement et laissés à la température ambiante du laboratoire. Une première lecture est faite (EC_1) avec le conductimètre, après 24 heures d'incubation. Les tubes sont ensuite mis au bain marie, dont la température est portée à 100°C, pendant 60 minutes. Une deuxième lecture de la conductivité est faite 24 heures après le passage des échantillons dans le bain marie (EC_2). Le pourcentage de cellules endommagées par le stress hydrique est estimé, selon la procédure décrite par Bajji *et al.* [10], comme suit :

$$\text{Dommages (\%)} = 100 (EC_1/EC_2)$$

La concentration de la chlorophylle a été déterminée à partir d'un 100 mg de tissus, pris du tiers médian de la dernière feuille bien développée, extraite dans 10 ml de l'acétone à 90% (v/v). Après filtration sur papier Watmann, les solutions, qui ont été incubées pendant 24 heures à l'obscurité, sont lues par spectrophotométrie aux densités optiques 663 et 647. La concentration des chlorophylles a, b et a + b, en mg de MF/l de solution, est déduite par les formules suivantes, attribuées à Lichtenthaler [11] par Ferus et Arkosiova [12] :

$$\text{Chl a (mg/l)} = (12.25 A_{663} - 2.79 A_{647}) \times D$$

$$\text{Chl b (mg/l)} = (21.5 A_{647} - 5.1 A_{663}) \times D$$

$$\text{Chl tot (mg/l)} = (7.15 A_{663} + 18.71 A_{647}) \times D$$

Où : A = absorbance mesurée à la longueur d'onde donnée et D = épaisseur de la cuvette (1 cm) qui représente la distance parcourue par le faisceau de la lumière émise par le spectromètre dans la solution.

Les résultats de la chlorophylle totale sont exprimés en mg/m² de surface foliaire en utilisant la formule donnée par Ferus et Arkosiova [12] :

$$\text{Chl tot (mg/m}^2\text{)} = [(V/1000)(1/SF)] \times [\text{Chl tot, mg/l}]$$

Où : Chl tot (mg/m²) = concentration de la chlorophylle totale en mg/ m² de surface foliaire, V = volume de l'acétone utilisé pour extraction, qui est égale à 10 ml dans le cas de la présente étude, SF = surface, en m², de l'échantillon foliaire utilisé pour l'extraction de la chlorophylle.

La date d'épiaison (PREC) a été notée pour les lignées parentales uniquement vu que la ségrégation des F₂, dès que 50% des épis sont hors de la gaine de la feuille étandard. A ce stade des échantillons ont été récoltés sur les lignées parentales pour estimer la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison (BIOE). A maturité des bottillons de végétation sont récoltés sur un rang de 1 m de long par parcelle élémentaire du dispositif des lignées parentales pour estimer les variables liées à la production. Le poids de la matière sèche totale (BIOM), le nombre (NE) et le poids des épis (WNE), la hauteur des plantes (HT), le poids de 1000 grains (PMG) et le rendement en grain (RDT) ont été déterminés après la récolte mécanique de l'essai. Chez les populations F₂, les mesures et notations sont faites pour les mêmes caractères sur des plantes individuelles.

2.2 ANALYSE DES DONNÉES

Les variables mesurées par unité de surface de sol sont traitées par une analyse de la variance pour déterminer l'effet génotype. Les variables mesurées sur des plantes individuelles sont traitées par une analyse statistique descriptive, pour obtenir les moyennes, les valeurs extrêmes minimales et maximales, l'amplitude et les variances phénotypiques des populations F₂ et des parents. Les composantes de la variation sont déduites pour estimer le degré d'héritabilité des caractères mesurés ainsi que les coefficients de la variabilité phénotypique (CV_p) et génotypique (CV_G). Ces coefficients sont calculés par caractère par le rapport des variances phénotypiques et génotypiques sur la moyenne générale du caractère :

$$CV_p (\%) = 100 \sigma_p^2 / Y$$

$$CV_G (\%) = 100 \sigma_G^2 / Y$$

Où : σ_p^2 et σ_G^2 sont la variance phénotypique totale et sa composante génétique, déduite de l'analyse de la variance en égalant les espérances moyennes aux carrés moyens des écarts [13] ; Y est la moyenne générale du caractère. Ces mêmes composantes sont estimées, pour les variables mesurées par plante, sur la base du calcul des variances de la F₂, prise comme étant égale à la variance phénotypique totale (σ_p^2), la variance des parents est prise comme étant égale à la variance résiduelle (σ_e^2), et la composante génétique de cette variance qui est déduite par différence [14] :

$$\sigma_G^2 = \sigma_p^2 - \sigma_e^2$$

L'héritabilité au sens large (h^2_{BS}) est estimée par le rapport de la variance génétique sur la variance phénotype totale [14]:

$$h^2_{BS} = \sigma^2_G / \sigma^2_P$$

La réponse attendue à la sélection (RS) directe sur la base du caractère Y est estimée par [14] :

$$RS = ih^2 \sqrt{\sigma^2_P} / Y$$

Où : i = différentielle de la sélection standardisée en unité d'écart type et Y = moyenne de la population F₂ concernée.

La comparaison des moyennes des variables est faite relativement à la plus petite différence significative au seuil de 5% (Ppds_{5%}), selon Steel et Torrie [13]. L'étude des relations entre les différentes variables mesurées a été faite sur la base du calcul des coefficients de corrélations phénotypiques. Les caractères qui jouent un rôle important dans la détermination du rendement en grain, sont identifiés par l'analyse de la régression progressive [15], [16]. Les analyses statistiques ont été faites par le logiciel CropStat 7.2.3 [17].

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 RÉSULTATS

3.1.1 ANALYSES DES LIGNÉES PARENTALES

L'analyse de la variance des caractères mesurés indique des effets génotypes significatifs (Tableau 1). Bien que le nombre de parents soit très réduit, des différences d'ordre génotypique apparaissent entre les différentes variétés. Ainsi du point de vue productivité Ofanto, Bousselam et Waha enregistrent les meilleurs rendements, avec des valeurs au-dessus de 4.0 t/ha (Tableau 2). Cette performance est associée, chez Ofanto, avec les meilleurs valeurs des chlorophylles a, b et totale, une feuille étendard de grande surface, au poids spécifique foliaire élevé, un fort pourcentage de dommages cellulaires et la hauteur des chaumes la plus faible (Tableau 2, Figure 1).

Waha et Bousselam se distinguent par des valeurs intermédiaires pour ces caractères, avec cependant les plus faibles pourcentages de dommages cellulaires et une meilleure biomasse accumulée au stade épiaison pour Bousselam (14.47 t/ha), une forte biomasse accumulée à maturité pour Waha (19.19 t/ha) et Bousselam (18.33 t/ha), et un meilleur nombre d'épis/m² et poids des épis pour Waha. Ces résultats suggèrent que la réduction de la hauteur est nécessaire pour augmenter le rendement en grain. Par contre, le taux de chlorophylle, la surface de la feuille étendard, le poids spécifique foliaire, la tolérance au stress hydrique, ainsi que la biomasse accumulée aux stades épiaison et à maturité ne sont toujours pas liés au rendement. Mohammed Ben Bachir est le génotype le plus haut (97.66 cm), le plus tardif (129.67 jours), le moins sensible au stress (52.6 %) et le moins productif (3.65 t/ha) (Tableau 2, Figure 1).

L'analyse des corrélations indique l'existence de liaisons significatives. Elles sont positives entre : les teneurs en chlorophylles a et b ($r = 0.864^*$), la surface de la feuille étendard et le poids spécifique foliaire ($r = 0.810^*$), la biomasse mesurée à maturité et le poids des épis ($r = 0.842^*$), le rendement et la biomasse aérienne mesurée à maturité ($r = 0.914^*$) et négatives entre la précocité à l'épiaison et le nombre d'épis ($r = -0.962^{**}$). Ces corrélations suggèrent que chez les lignées parentales, c'est la biomasse aérienne à maturité qui détermine le rendement en grain final.

En effet, parmi les 14 variables mesurées et soumises à l'analyse de la régression progressive seules les variables BIOM et TRE sont retenues dans le modèle explicative du rendement en grain chez les parents : $RDT = 0.345 (\pm 0.038) BIOM + 0.036 (\pm 0.011) TRE - 4.97$ ($R^2 = 0.943$). Ce modèle indique aussi que l'effet direct de la BIOM sur le rendement est de 1.122, alors que celui de la TRE est de 0.417. Dans le cas où les variables relatives à la physiologie de la plante (chlorophylle, % dommage, TRE, SF, PSF) sont retirées de l'analyse, le modèle ne retient que la BIOM qui explique près de 83.5% de la variation du rendement : $RDT = 0.281 (\pm 0.062) BIOM - 0.913$ ($R^2 = 0.835$). L'effet direct dans ce cas est réduit à la valeur de 0.914. Dans le cas où la BIOM n'est pas introduite, le modèle retient le poids des épis (WNE) comme seule variable explicative du rendement : $RDT = 0.237 (\pm 0.111) WNE + 1.728$ ($R^2 = 0.535$). L'effet direct du poids des épis sur le rendement est de 0.731. La biomasse aérienne ainsi que le poids des épis produit par unité de surface semée, sont des caractères mesurables à la fin du cycle, au même titre que le rendement en grains, et de ce fait, ils sont peu utiles pour la sélection ou l'identification précoce de génotypes adaptés aux environnements variables, comme il est espéré pour les tests physiologiques. Cependant, au cours de cette campagne, les paramètres physiologiques apparaissent, eux aussi, peu efficaces dans l'identification des génotypes productifs.

Tableau 1. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des caractères mesurés chez les parents

Source de variation	Répétition	Génotype	Résiduelle	CV (%)
dII	2	5	10	
% dommage	3.17 ^{ns}	132.63**	6.12	4.1
Chl a	0.16 ^{ns}	4.29**	0.46	8.3
Chl b	0.040 ^{ns}	1.65**	0.057	12.9
Chl tot	3.27 ^{ns}	918.33**	45.19	9.1
TRE	0.23 ^{ns}	47.24*	9.32	4.8
SF	5.10*	25.40**	0.83	6.5
PSF	0.18 ^{ns}	1.15*	0.26	7.3
PREC	0.38 ^{ns}	42.88**	1.12	1.9
BIOE	0.071 ^{ns}	13.22**	0.35	4.5
BIOM	0.80 ^{ns}	3.74**	0.65	4.6
NE	705.56 ^{ns}	4152.22**	272.22	4.7
WNE	1.86*	3.42**	0.30	5.9
HT	216.22**	815.40**	16.15	6.1
PMG	12.38*	23.06**	2.51	4.2
RDT	0.041 ^{ns}	0.35*	0.10	8.1

% dommage = dommages cellulaires causés par le stress hydrique et thermique ; Chl a = chlorophylle a (mg/l) ; Chl b = chlorophylle b (mg/l) ; Chl tot = chlorophylle totale (mg/m²) ; TRE = teneur relative en eau (%) ; SF = surface foliaire de la feuille étendard (cm²) ; PSF = poids spécifique foliaire (mg/cm²) ; PREC = précocité à l'épiaison (jours) ; BIOE = biomasse aérienne accumulée au stade épiaison (t/ha) ; BIOM = biomasse aérienne accumulée à maturité (t/ha) ; NE = nombre d'épis/m² ; WNE = poids des épis (t/ha) ; HT = hauteur des plantes (cm) ; PMG = poids de 1000 grains (g) ; RDT = rendement en grain (t/ha), CV (%) = coefficient de variation, ns, *, ** = effets non significatif et significatif au seuil 5 et 1%, respectivement.

Tableau 2. Valeurs moyennes des caractères mesurés sur les lignées parentales.

Génotype	%Dommage	Chl a	Chl b	TRE	SF	PSF	PREC	BIOE	BIOM
Ofanto	67.04	10.23	3.21 ^a	80.64	17.98	8.16	124.67	12.15	17.53
Bousselam	55.30	8.34	2.25	74.52	13.43	6.46	125.00	14.47	18.33
Waha	55.76	8.36	1.53	79.33	14.85	7.28	121.00	11.94	19.19
Mrb ₅	68.26	6.83	1.38	79.73	15.74	7.22	119.33	10.01	16.22
MBB	52.60	8.07	1.39	83.21	9.35	6.73	129.67	15.11	16.62
Korifla	63.03	7.13	1.38	86.32	13.10	6.66	121.00	15.18	16.98
Moyenne	60.33	8.16	1.85	80.63	14.08	7.08	123.44	13.14	17.48
Ppds _{5%}	4.50	1.23	0.43	5.55	1.65	0.94	1.93	1.08	1.46
Génotype	NE	WNE	HT	PMG	RDT	Chl tot			
Ofanto	436.66	9.20	55.00	50.14	4.11	108.42			
Bousselam	440.00	10.01	55.33	51.46	4.03	68.88			
Waha	460.00	11.12	57.66	47.13	4.45	76.97			
Mrb ₅	470.00	9.26	70.00	46.89	3.48	64.90			
MBB	370.00	7.92	97.66	46.36	3.65	62.39			
Korifla	466.66	9.07	60.00	53.04	3.99	64.32			
Moyenne	440.56	9.43	65.94	49.17	3.95	74.31			
Ppds _{5%}	30.01	1.01	7.31	2.88	0.58	5.78			

% dommage = dommages causés par le stress hydrique (%) ; Chl a = chlorophylle a (mg/l) ; Chl b = chlorophylle b (mg/l) ; Chl tot = chlorophylle totale (mg/m²) ; TRE = teneur relative en eau (%) ; SF = surface foliaire de la feuille étendard (cm²) ; PSF = poids spécifique foliaire (mg/cm²) ; PREC = durée à l'épiaison (jours) ; BIOE = biomasse aérienne accumulée au stade épiaison (t/ha) ; BIOM = biomasse aérienne accumulée à maturité (t/ha) ; NE = nombre d'épis/m² ; WNE = poids des épis (t/ha) ; HT = hauteur des plantes (cm) ; PMG = poids de 1000 grains (g) ; RDT = rendement en grain (t/ha).

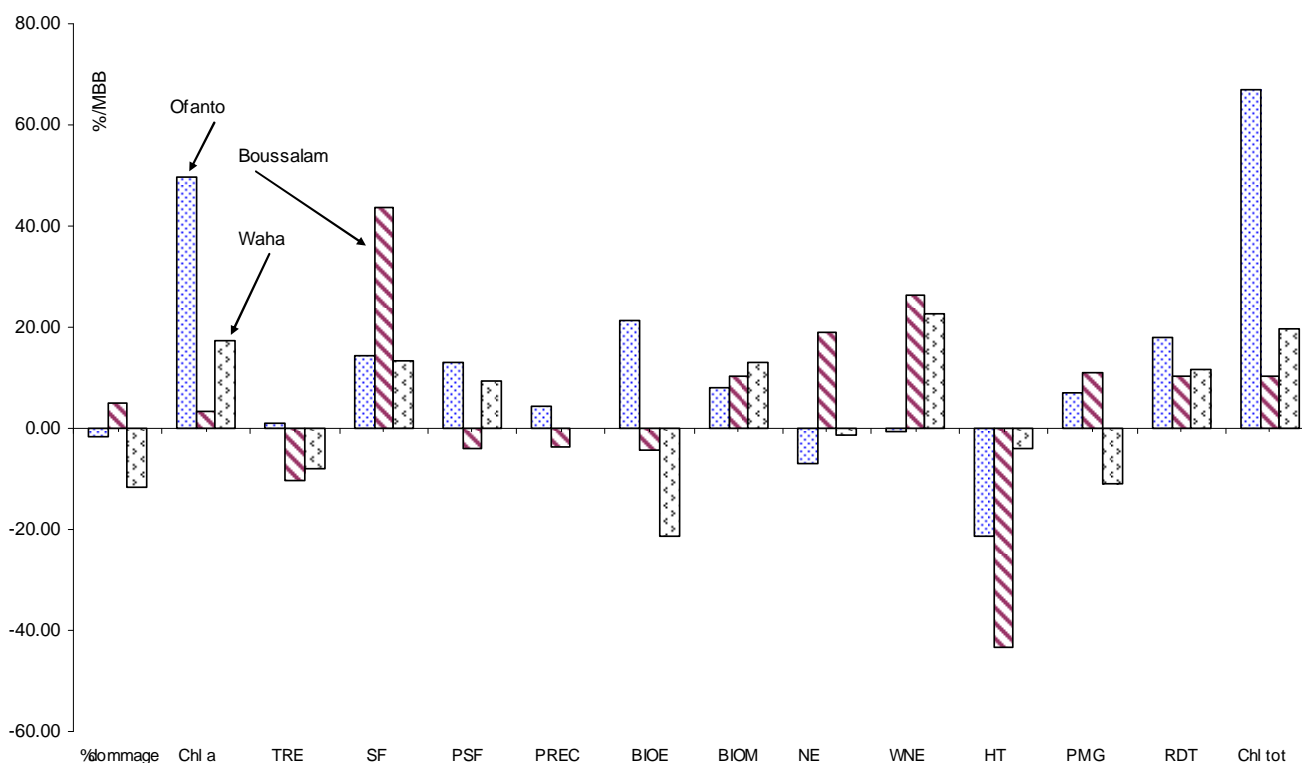


Fig. 1. Variation des paramètres mesurés chez les génotypes à haut rendement en % de celles mesurées chez MBB.

3.1.2 ANALYSE DES POPULATIONS F₂

Parmi les 4 croisements étudiés, Ofanto/Waha se distingue par les plus faibles valeurs moyennes pour la biomasse aérienne (16.69 g), le nombre (3.02) et le poids d'épis par plante (9.22) (Tableau 3, Figure 2). Les valeurs extrêmes maximales sont notées chez Ofanto/MBB pour la biomasse aérienne mesurée à maturité (21.61 g) et la hauteur de la végétation (79.5 cm), et chez Ofanto/Korifla pour le nombre (3.73) et le poids d'épis par plante (10.90) (Tableau 3, Figure 2). Ceci suggère que la dominance a agi dans le sens d'une forte expression de ces caractères chez les croisements considérés. Deshmukh *et al.* [18] considèrent que les coefficients de la variabilité phénotypique (CV_p) et génotypique (CV_G) dont la valeur est supérieure à 20% sont élevés, ceux dont la valeur est située entre 10 et 20%, sont moyens et ceux dans la valeur est inférieure à 10% sont faible. Des valeurs élevées pour les CV_p et CV_G suggèrent que la sélection sur la base des caractères concernés serait efficace, parce qu'il y a une bonne corrélation entre le phénotypique mesuré et l'expression du génotype [19]. Dans le contexte de la présente étude, Les CV_p et CV_G sont variables selon le croisement et le caractère. Pour la hauteur de la végétation, ils sont faibles chez Ofanto/Waha, juste moyens chez Ofanto/MBB et Ofanto/Korifla, et élevés chez Ofanto/Mrb₅. Pour le reste des caractères mesurés, ils sont considérés comme étant élevés (Tableau 3).

Le progrès en amélioration des plantes est conditionné par la nature et le degré de la variation d'origine génétique et non génétique observable chez les différents caractères mesurés [14]. Dans la mesure où l'ensemble des caractères mesurables sont plus ou moins soumis à l'effet du milieu, l'étude de l'héritabilité et du gain génétique attendu en sélection sont utiles pour déterminer les possibilités d'amélioration. Falconer et McKay [14] mentionnent que les valeurs de l'héritabilité inférieures à 30 % sont considérées comme faibles, elles sont moyennes entre 30 à 60 % et très élevées, au-delà de 60 %. Dans la présente étude, les valeurs prises par le degré de détermination génétique sont pratiquement élevés pour l'ensemble des caractères analysés chez toutes les populations F₂ étudiées (Tableau 3).

L'étude des corrélations indique que la biomasse est fortement corrélée avec le nombre et le poids des épis par plante, chez les 4 croisements (Tableau 4). Le nombre d'épis est aussi fortement corrélé avec le poids des épis, chez toutes les populations F₂. L'effet de la hauteur est peu perceptible et présente une faible corrélation avec les autres variables (BIOM, NE et WNE) (Tableau 4). La régression du poids des épis sur la biomasse aérienne des différents croisements est indiquée en figure 3. L'analyse en chemin montre que la biomasse aérienne a l'effet direct le plus important sur l'expression du poids des épis (Tableau 4). La hauteur ne semble avoir d'effet moyen qu'au niveau du croisement Ofanto/MBB.

Tableau 3. Valeurs moyennes, minimales et maximales, variances (σ^2), coefficients de variation phénotypique (CV_p) et génétique (CV_G) et héritabilité au sens large (h^2_{BS}) des caractères mesurés chez les populations F_2 .

Croisement	Trait	Moyenne	Min	Max	Amplitude	$\sigma^2_{F_2}$	CV_p	CV_G	h^2_{BS}
Ofanto/MBB	BIOM	21.61	7.60	52.50	44.90	79.02	41.14	35.22	73.31
Ofanto/Waha	BIOM	16.69	4.30	45.70	41.40	64.72	48.20	40.30	69.89
Ofanto/Mrb5	BIOM	19.66	5.70	80.70	75.00	188.76	69.88	66.76	91.27
Ofanto/Korifla	BIOM	19.90	5.40	52.10	46.70	109.38	52.56	47.92	83.15
Ofanto/MBB	HT	79.50	45.00	107.00	62.40	234.85	19.28	17.84	85.66
Ofanto/Waha	HT	60.39	45.00	70.00	25.00	31.13	9.24	7.20	60.79
Ofanto/Mrb5	HT	65.80	37.00	105.00	68.00	186.07	20.73	19.47	88.17
Ofanto/Korifla	HT	56.63	40.00	88.00	48.00	69.76	14.75	12.01	66.26
Ofanto/MBB	NE	3.45	1.00	9.00	8.00	1.76	38.45	31.18	65.75
Ofanto/Waha	NE	3.02	1.00	8.00	7.00	1.61	42.02	34.12	65.95
Ofanto/Mrb5	NE	3.26	1.00	15.00	14.00	4.26	63.31	58.77	86.17
Ofanto/Korifla	NE	3.73	2.00	11.00	9.00	2.97	46.20	42.55	84.81
Ofanto/MBB	WNE	10.34	2.50	24.60	22.10	19.52	42.73	36.30	72.17
Ofanto/Waha	WNE	9.22	1.90	30.90	29.00	25.89	55.19	45.19	67.06
Ofanto/Mrb5	WNE	9.34	1.77	44.20	42.40	52.03	77.23	72.11	87.18
Ofanto/Korifla	WNE	10.90	2.62	33.7	31.0	41.97	59.44	54.34	83.58

BIOM = biomasse aérienne par plante mesurée à maturité (g); HT = hauteur des plantes (cm); NE = nombre d'épis/plante; WNE= poids des épis par plante (g).

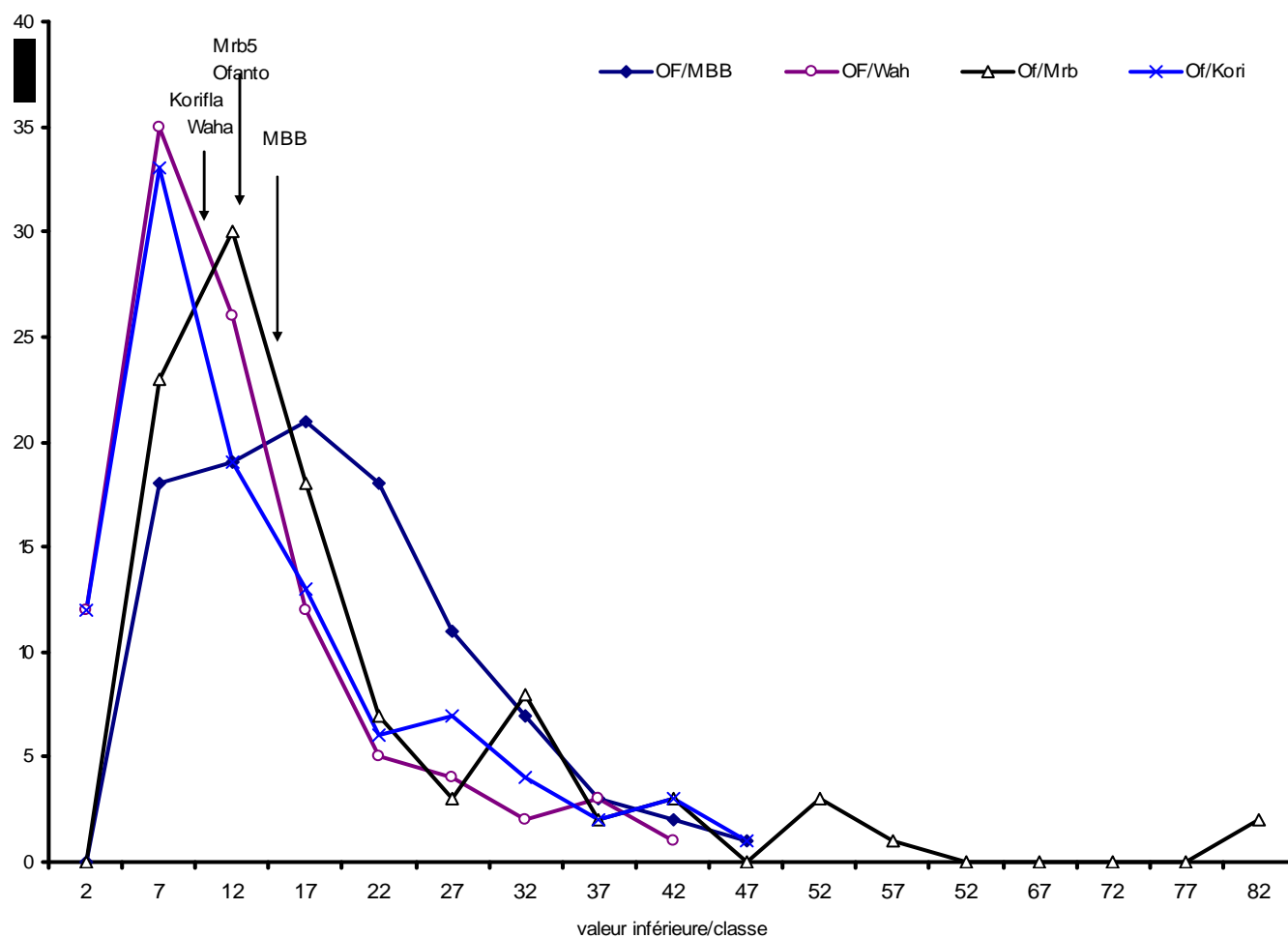


Fig. 2. Variation comparée de la biomasse mesurée par plante chez les populations F_2 .

Tableau 4. Coefficients de corrélation phénotypique entre les variables mesurées chez les populations F₂.

Croisement	Ofanto/MBB			Effet direct	Ofanto/Waha			Effet direct
	HT	NE	WNE		HT	NE	WNE	
BIOM	0.282	0.814	0.917	0.432	0.431	0.891	0.973	1.271
HT		0.107	0.184	-0.160		0.373	0.464	-0.148
NE			0.778	0.643			0.898	0.545
Croisement	Ofanto/Mrb ₅			Effet direct	Ofanto/Korifla			Effet direct
	HT	NE	WNE		HT	NE	WNE	
BIOM	0.549	0.914	0.973	0.694	0.309	0.918	0.971	0.914
HT		0.418	0.508	-0.116		0.139	0.320	-0.132
NE			0.926	0.543			0.895	0.521

BIOM = biomasse aérienne par plante mesurée à maturité (g); HT = hauteur des plantes (cm); NE = nombre d'épis/plante; WNE= poids des épis par plante (g).

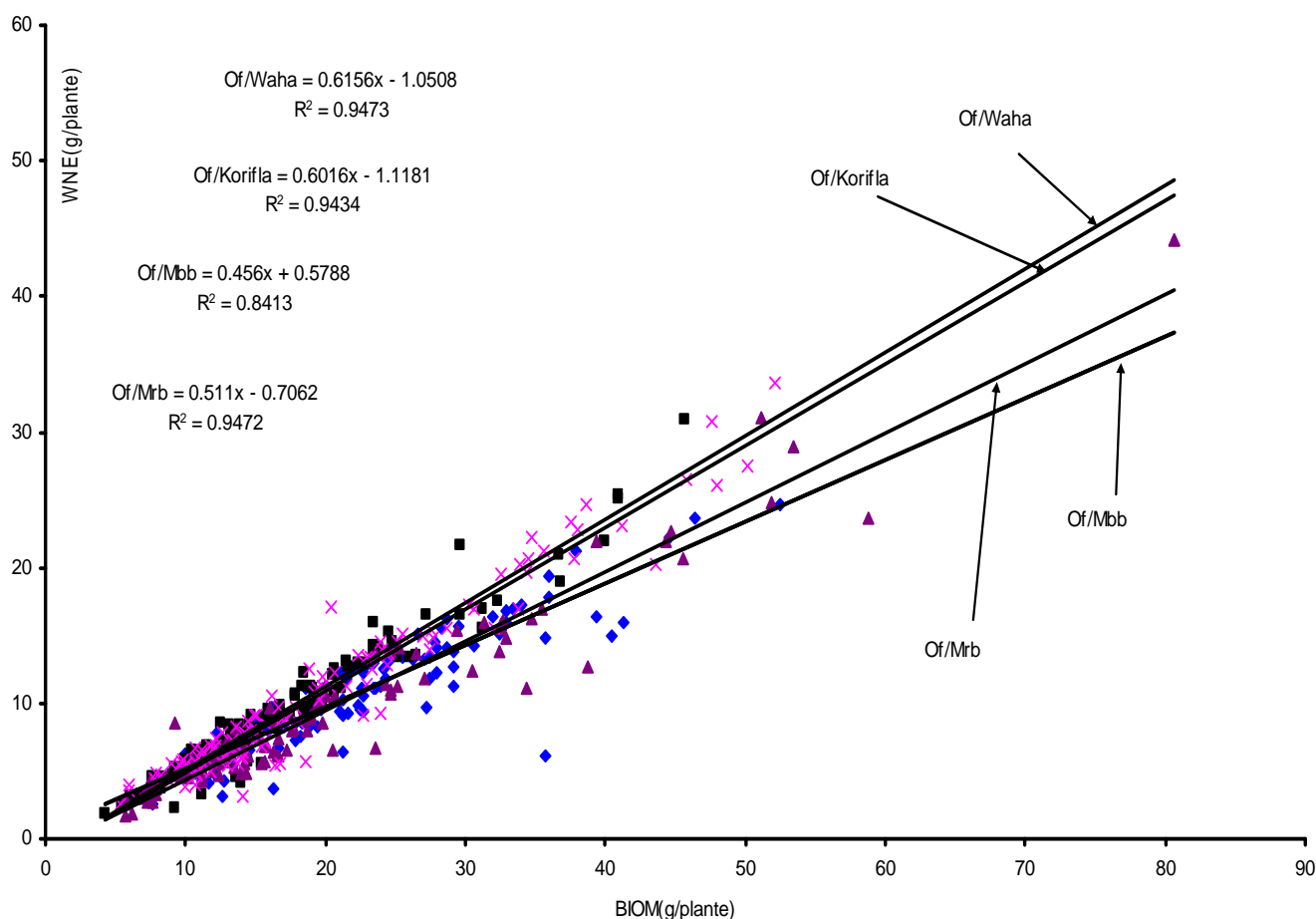


Fig. 3. Relation entre WNE et BIOM mesurées par plante chez les populations F₂.

Le rendement qui est fortement tributaire de la biomasse aérienne et du poids des épis chez les parents, est donc aussi lié au poids des épis, au nombre d'épis et à la biomasse aérienne chez les populations F₂. La réponse attendue (en F₃) à la sélection (RS) directe (en F₂) peut être envisagée sur la base des caractères liés qui sont la biomasse aérienne, le poids et le nombre d'épis et éventuellement sur la base de la hauteur des plantes. Elle est déduite uniquement pour la sélection faite sur la base de la biomasse et le poids des épis.

Pour une intensité de sélection 10%, la valeur de table de i est de 1.76 [14], les valeurs de la réponse attendue sont données au tableau 5. La descendance aux meilleures performances pour la biomasse aérienne attendue est celle issue du croisement Ofanto/MBB, alors que le poids des épis, c'est la sélection du croisement Ofanto/Korifla qui apparaît le meilleur (Tableau 5).

Tableau 5. Valeurs de la réponse à la sélection sur la base de la biomasse aérienne et du poids des épis (RS), Moyenne de la F_2 (μ_{F_2}), moyenne de la fraction sélectionnée (μ_S) et moyenne attendue de la descendance de la fraction sélectionnée (μ').

Croisement	Critère de sélection	RS	μ_{F_2}	μ_S	μ'
Ofanto/MBB	BIOM	0.53	21.61	39.96	22.14
Ofanto/Waha	BIOM	0.59	16.69	35.17	17.28
Ofanto/Mrb ₅	BIOM	1.12	19.66	52.08	20.78
Ofanto Korifla	BIOM	0.77	19.90	42.99	20.67
Ofanto/MBB	WNE	0.54	10.34	19.08	10.88
Ofanto/Waha	WNE	0.65	9.22	20.69	9.87
Ofanto/Mrb ₅	WNE	1.18	9.34	40.67	10.52
Ofanto/Korifla	WNE	0.87	10.90	25.22	11.77

BIOM = biomasse aérienne par plante mesurée à maturité (g); WNE = poids des épis par plante (g).

3.2 DISCUSSION

L'efficacité d'un programme d'amélioration des plantes dépend de la capacité du sélectionneur à identifier les individus supérieurs pour le caractère d'intérêt. La sélection directe pour le caractère d'intérêt est généralement la plus intéressante, lorsque le caractère en question est sous contrôle génétique simple. Pour les caractères complexes, la sélection directe et indirecte sur la base des caractères liés s'est avérée toujours moins efficace, notamment dans les environnements variables. De sorte que les sélectionneurs recherchent à utiliser d'autres paramètres qui améliorent la relation phénotype-génotype. Les physiologistes suggèrent l'utilisation des tests physiologiques pour identifier des génotypes tolérants et productifs sous stress [20], [21]. Parmi les tests suggérés figurent, entre autres, le poids spécifique foliaire [22], la température du couvert végétal [23], le test de l'intégrité cellulaire [24], l'accumulation des osmolytes [25], le statut hydrique foliaire [23], [25], [26] et le taux de chlorophylle [12], [27]. Les résultats de cette étude montrent que sur population F_2 , en semis espacé, il est peu pratique d'effectuer des tests physiologiques sur la plante qui représente l'unité de sélection.

Dans le cas de la présente étude, les résultats des tests physiologiques appliqués sur un jeu restreint de lignées parentales indiquent peu de liaisons avec la productivité, suggérant l'inefficacité des tests physiologiques comme aides à la sélection de génotypes tolérants et productifs. Par contre chez les lignées parentales comme chez les F_2 , des liaisons fortes existent entre la biomasse aérienne, le nombre d'épis et le poids des épis. Ce qui corrobore les résultats de De Vita *et al.* [28] qui mentionnent que le gain génétique obtenu sur blé dur, en Italie, était associé à un grand nombre de grains produit par m^2 , à une biomasse aérienne et un nombre d'épis élevés et à une réduction de la hauteur des chaumes.

L'étude de ces caractères chez les populations F_2 indique la présence d'une variation phénotypique importante. Le coefficient de détermination de l'héritabilité au sens large est élevé pour l'ensemble des caractères mesurés. Dans ce contexte, Fellahi *et al.* [29] mentionnent que des coefficients de variation génotypiques élevés, associés à des héritabilités élevées et à des gains génétiques conséquents, fournissent de meilleures informations prédictives que chaque paramètre pris isolément. En effet des valeurs élevées concomitantes de ces trois paramètres confortent sur les possibilités de sélectionner des génotypes possédant des caractéristiques désirables parmi la descendance. La biomasse aérienne semble avoir l'effet direct le plus important dans la détermination du rendement en grain. En effet, Golabadi *et al.* [26] suggèrent que la sélection sur la base de la biomasse doit être faite sous conditions favorables, alors que sous conditions défavorables, elle doit être conduite sur la base du poids de l'épi et du poids de 1000 grains. Par contre, Cooper *et al.* [30] rapportent que la sélection précoce directe ou indirecte est peu efficace sous stress, et suggèrent que dans l'attente d'une meilleure compréhension des mécanismes physiologiques contrôlant de la tolérance aux stress, la sélection doit être conduite sous conditions favorables. Alors que Brancourt-Hulmel *et al.* [31] proposent de pratiquer la sélection navette sous conditions favorables et défavorables à la fois.

4 CONCLUSION

L'expression des liaisons des résultats des tests physiologiques avec les paramètres morphologiques de la productivité est variable en fonction du génotype et de l'environnement. Ainsi, le taux de chlorophylle, la surface de la feuille étendue, le poids spécifique foliaire, la tolérance aux stress hydrique et thermique et la biomasse accumulée au stade épiaison ne sont pas toujours liés au rendement. Seule la biomasse aérienne mesurée à maturité apparaît comme un déterminant du rendement en grain. Les populations F_2 montrent une variabilité phénotypique importante pour les paramètres mesurés. Les coefficients de l'héritabilité sont élevés en valeurs, suggérant l'efficacité de la sélection précoce sur la base des variables

étudiées. L'analyse en chemin confirme que la biomasse aérienne a l'effet direct le plus important sur l'expression du poids des épis par plante. La réponse attendue à la sélection directe déduite pour la biomasse et le poids des épis, suggère que la descendance aux meilleures performances est celle issue du croisement Ofanto/MBB, pour la biomasse alors que pour le poids des épis, c'est le croisement Ofanto/Korifla qui est le plus intéressant.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Bouzerzour and A. Benmahammed, "Variation in early growth, canopy temperature, translocation and yield of four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid conditions," *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 142–154, 2009.
- [2] M. Salmi, L. Haddad, A. Oulmi, A. Benmahammed and A. Benbelkacem, "Variabilité phénotypique et sélection des caractères agronomiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) Sous conditions semi-arides," *European Scientific Journal*, 11(21): 99 - 111. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, vol. 11, no. 21, pp. 99–111, 2015.
- [3] A. Adjabi, H. Bouzerzour and A. Benmahammed, "Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Grain Yield," *Journal of Agronomy*, vol. 13, no. 3, pp. 131–139, 2014.
- [4] A. Oulmi, A. Benmahammed, Z. Laala, A. Adjabi and H. Bouzerzour, "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*, vol. 8, pp. 436 - 443, 2014.
- [5] Z. Fellahi, A. Hannachi, H. Bouzerzour and A. Benbelkacem, "Inheritance Pattern of Metric Characters Affecting Grain Yield in two Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Crosses under Rainfed Conditions," *Jordan Journal of Biological Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 175–181, 2015.
- [6] Z. Fellahi, "Aptitude à la combinaison et héritabilité de quelques caractères agronomiques du blé tendre (*Triticum aestivum* L.)," *Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab- Blida*, 136 p, 2013.
- [7] A. Hannachi, "Analyse diallèle de quelques caractères associés à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride," *Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab- Blida*, 100 p, 2013.
- [8] S. Hamli, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Oulmi, K. Kadi et D. Addad, "Déterminisme génétique des caractères morpho-physiologiques liés au rendement chez le blé dur en zone semi-aride des hauts plateaux Sétifiens, Algérie," *European Scientific Journal*, vol. 11, pp. 146–160, 2015.
- [9] P. L. Spagnoletti Zeuli and C. O. Qualset, "Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat," *Jordan Plant Breeding*, vol. 105, no. 3, pp. 189 - 202, 1990.
- [10] M. Bajji, J. M. Kinet and S. Lutts, "The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat," *Plant Growth Regulation*, vol. 36, pp. 61 - 70, 2001.
- [11] H. K. Lichtenthaler, "Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes," *Methods in Enzymology*, vol. 148, pp. 350 - 382, 1987.
- [12] P. Ferus and M. Arkosiova, "Variability of chlorophyll content under fluctuating environment," *Acta fytotechnica et zootechnica*, vol. 4, no. 2, pp. 123 - 125, 2001.
- [13] R. G. Steel and R. H. Torrie, "Principles and procedure of statistics," MCGraw-Hill. Inc. New York. 1982..
- [14] D. S. Falconer and F. C. Mackey, "Introduction to quantitative genetics," 4th ed., Longman, New York, 1996.
- [15] Z. Fellahi, A. Hannachi, H. Bouzerzour and A. Boutekrabort, "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*, vol. 3, no. 1, pp. 16 - 26, 2013a.
- [16] A. Hannachi, Z. Fellahi, H. Bouzerzour and A. Boutekrabort, "Correlation, Path Analysis and Stepwise Regression in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) under Rainfed Conditions," *Agriculture and Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 122 - 131, 2013.
- [17] CropStat 7.2.3. "Software package for windows," *International Rice Research Institute, IRRI, Manila*, 2008.
- [18] S. N. N. Deshmukh, M. S. Basu and P. S. Reddy, "Genetic variability, character association and path coefficient analysis of quantitative traits in Viginia bunch varieties of groundnut," *Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 56, pp. 516 - 521, 1986.
- [19] G. P. Singh, K. R. Maurya, B. Prasad and A. K. Singh, "Genetic variability in *Capsicum annum* L," *Journal of Applied Biology*, vol. 4, pp. 19 - 22, 1994.
- [20] R. A. Richards, "Defining selection criteria to improve yield under drought," *Plant Growth Regulation*, vol. 20, pp. 157 - 166, 1996.
- [21] J. Passioura, "Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management," *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress "New directions for a diverse planet" Brisbane, Australia. 12 pages*, 2004.

- [22] S. Asseng, N.C. Turner, T. Botwright, and A.G. Condon, "Evaluating the Impact of a Trait for Increased Specific Leaf Area on Wheat Yields Using a Crop Simulation Model," *Agronomy Journal*, vol. 95, pp. 10 - 19, 2003.
- [23] A. Kumar and D. P. Singh, "Use of physiological indices as a screening technique for drought tolerance in Oilseed *Brassica* species," *Annals of Botany*, vol. 81, pp. 413 - 420, 1998.
- [24] C. M. Cossani and M. P. Reynolds, "Physiological traits for improving heat tolerance in wheat," *Plant physiology*, vol. 160, no. 4, pp. 1710 - 1718, 2012.
- [25] M. M. Abdalla and N. H. El-Khoshiban, "The Influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic and hormonal contents of two *Triticum aestivum* cultivars," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 3, pp. 2062 - 2074, 2007.
- [26] M. Golabadi, A. Arzani and S. M. M. Maibody, "Evaluation of variation among durum wheat F3 families for grain yield and its components under normal and water-stress field conditions," *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, vol. 41, pp. 263 - 267, 2005.
- [27] H. K. Poshtmasari, H. Pirdashti, M. Nasiri and M. A. Bahmanyar, "Chlorophyll content and biological yield of modern and old rice cultivars in different urea fertilizer rates and applications," *Asian Journal of Plant Science*, vol. 11, pp. 1 - 4, 2007.
- [28] P. De Vita, O. D. Nicosia, F. Nigro, C. Platani, C. Riefolo, N. Di Fonzo and L. Cattivelli, "Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century," *European Journal of Agronomy*, vol. 26, pp. 39 - 53, 2007.
- [29] Z. Fellahi, A. Hannachi, A. Guendouz, H. Bouzerzour and A. Boutekrabt, "Genetic variability, heritability and association studies in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes," *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 4, pp. 1161 - 1166, 2013b.
- [30] M. Cooper, R. E. Stucker, I. H. De Lacy and B. D. Harch, "Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield," *Crop Science*, vol. 37, pp. 1168 - 1176, 1997.
- [31] M. Brancourt-Hulmel, E. Heumez, P. Pluchard, D. Beghin, C. Depatureaux, A. Giraud and J. Le Gouis, "Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-input levels," *Crop Science*, vol. 45, pp. 1427 - 1431, 2005.