



Revue semestrielle – Université Ferhat Abbas Sétif 1

REVUE AGRICULTURE

Revue home page: <http://revue-agro.univ-setif.dz/>



Analyse de l'adaptabilité et la stabilité de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions sud méditerranéennes

Analysis of adaptability and stability of some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties to the south Mediterranean conditions

Abderrahmane HANNACHI^{1,*}, Zine El Abidine FELLAHI² et Hamenna BOUZERZOUR³

¹Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), Division des Agrosystèmes Est, Sétif, Algérie.

²Département d'Agronomie, Fac. Sci. Nat. Vie Sci. Univers, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj, Algérie.

³Département de Biologie et d'Ecologie Végétale, Fac. Sci. Nat. Vie, Lab. VRBN, Université Ferhat Abbas Sétif-1, Algérie.

* Email : abderhannachi@yahoo.fr

ARTICLE INFO

L'histoire de l'article

Reçu :

Accepté : 27/12/2019

Mots clés : Sélection, Stabilité, AMMI, Rendement, Semi-aride, *Triticum durum*..

Keywords: Selection, Stability, AMMI, Yield, Semi-arid, *Triticum durum*.

RESUME

L'étude a été réalisée sur le site expérimental de l'unité de recherche de Sétif relevant de l'INRAA durant cinq campagnes agricoles successive (2012 à 2016). Elle avait comme objectif d'analyser l'interaction Génotype x Environnement (G x E), l'adaptabilité et la stabilité du rendement de six variétés de blé dur en utilisant des indices de stabilité paramétriques. Les résultats indiquent des effets significatifs de l'interaction G x E et de l'environnement. L'étude comparative de ces méthodes a permis d'identifier les génotypes Ofanto et Guemgoum Rkhem comme stables. Ofanto détient à la fois la performance du rendement et la stabilité, alors que Guemgoum Rkhem quoi qu'il soit stable sa performance du rendement est la plus faible.

ABSTRACT

This study was carried out at the experimental site of the Sétif research unit of INRAA during five successive cropping years (2012 to 2016). It aimed to analyze the Genotype x Environment (G x E) interaction, adaptability and yield stability of six durum wheat varieties using parametric stability indices. The results indicated significant G x E interaction and environmental effects. The comparative study of these methods made possible to identify the genotypes Ofanto and Guemgoum Rkhem as stable. Ofanto holds both yield performance and stability; while Guemgoum Rkhem, even though it was stable, its yield was the lowest.

1. Introduction

La sélection de génotypes possédant un haut potentiel de rendement en grains est certainement l'objectif principal du programme national d'amélioration du blé dur. Cependant lorsque les futures variétés sont destinées à être cultivées dans des environnements connues pour leurs contraintes souvent intenses, en termes de stress thermique et hydrique, comme c'est le cas des hautes plaines orientales, un haut potentiel de rendement n'est pas suffisant en lui-même s'il n'est pas associé à l'adaptabilité à la variation pédoclimatique des milieux de productions (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012 ; Haddad *et al.*, 2016).

De ce fait, l'objectif d'amélioration du blé dur est le développement de cultivars à haut rendement et adaptés aux conditions climatiques dominantes de la région ciblée. Ces futures variétés doivent avoir la capacité de valoriser, au mieux, les spécificités des différents terroirs et itinéraires techniques. Elles doivent réagir positivement à la diversité des situations dans lesquelles elles sont placées où dans lesquelles la variation de milieu les place (Annicchiarico *et al.*, 2005 ; Nouar *et al.*, 2012 ; Adjabi *et al.*, 2014).

En effet il est connu que le rendement d'un cultivar donné varie d'un lieu à l'autre, notion d'adaptabilité, et d'une année à l'autre, notion de stabilité (Lin *et al.*, 1986). Des résultats de plusieurs recherches semblent indiquer que le potentiel de rendement est peu ou négativement lié à la stabilité et à l'adaptabilité (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Kadi *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2012 ; Haddad *et al.*, 2016).

Le potentiel de rendement est aisément mesuré en absence de stress dans un environnement donné, par contre la stabilité et l'adaptabilité sont des notions plus complexes et surtout plus difficiles à cerner surtout lorsqu'on cherche à cumuler chez un génotype donné la stabilité, l'adaptabilité et le potentiel de rendement (Lin *et al.*, 1986). L'instabilité est induite par des interactions du génotype avec les milieux de culture qui sont causées par la sensibilité vis-à-vis des stress aussi biotiques qu'abiotiques (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997, Annicchiarico *et al.*, 2005). Ainsi la stratégie d'évaluation du comportement de matériel végétal sous sélection est multi locales pour prendre en compte la diversité des milieux représentative de celle sous laquelle les futures variétés doivent évoluer (Prost *et al.*, 2007 ; Menad *et al.*, 2011 ; Meziani *et al.*, 2011 ; Bendjamaa *et al.*, 2014). Ceci suppose aussi que la sélection doit porter sur les caractéristiques qui augmentent, aussi bien le potentiel de rendement, que la tolérance vis-à-vis des stress. Cependant certains résultats préliminaires obtenus avec du matériel végétal sensible, semblent indiquer que les deux objectifs sont difficilement associables, sous les conditions des hautes plaines orientales (Mekhlouf *et al.*, 2006 ; Benmahammed *et al.*, 2010 ; Nouar *et al.*, 2010, Nouar *et al.*, 2012 ; Haddad *et al.*, 2016).

La présente étude se fixe pour objectif d'analyser l'adaptabilité et la stabilité de six variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) par le biais des méthodes statistiques paramétriques dont celles basées sur la régression conjointe, la variance et les paramètres multivariés.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal et dispositif expérimental

Le matériel végétal utilisé dans cette investigation se compose de six variétés de blé dur à savoir : Waha (G1), Zenati Bouteille/Flemingo (G2), Mexicali₇₅ (G3), Ofanto (G4), Gta dur (G5) et Guemgoum Rkhem (G6). Ces génotypes ont été évalués durant cinq campagnes agricoles consécutives au niveau de la station de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) de Sétif de 2012 à 2016. Les génotypes sont semés dans un dispositif en blocs avec trois répétitions, sur des parcelles élémentaires constituées de trois rangs de 1.5 m de long avec un espacement entre rangs de 0.20 m. L'essai a été fertilisé avec 100 kg ha⁻¹ d'engrais phosphaté à 46 % (superphosphate) avant le semis et avec 100 kg ha⁻¹ d'engrais azoté (urée à 46 %) apporté en deux fractions, avant le semis et au stade tallage. Le contrôle des adventices est fait avec du Grand Star® (75 % Tribenuron Methyl) à raison de 12 g ha⁻¹. Le rendement est déterminé à la récolte.

2.2. Analyse des données

2.2.1. Analyse de la variance

Les données collectées ont été soumises à une analyse de la variance selon le modèle combiné et fixe suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \rho k_{(j)} + \varepsilon_{ijk}$$

Avec Y_{ijk} : observation sur l' $i^{\text{ème}}$ génotype dans le $j^{\text{ème}}$ environnement et le $k^{\text{ème}}$ bloc, μ : moyenne générale, α_i : effet du génotype i , β_j : effet de l'environnement j , $\alpha\beta_{ij}$: effet de l'interaction génotype i et l'environnement j , $\rho k_{(j)}$: effet du bloc aléatoire avec l'environnement, ε_{ijk} : résidus du modèle qui sont supposés d'être distribués de façon aléatoire à moyenne nulle et de variance homogène. Les tests de signification statistique pour les composantes génotypique, environnementale et celle de l'interaction génotype x environnement ont été calculés en utilisant le F -test de Fisher.

2.2.2. Analyse de l'adaptabilité et la stabilité

Plusieurs méthodes statistiques paramétriques ont été utilisées pour étudier l'adaptabilité et la stabilité. Les différents indices sont résumés dans la figure 1.

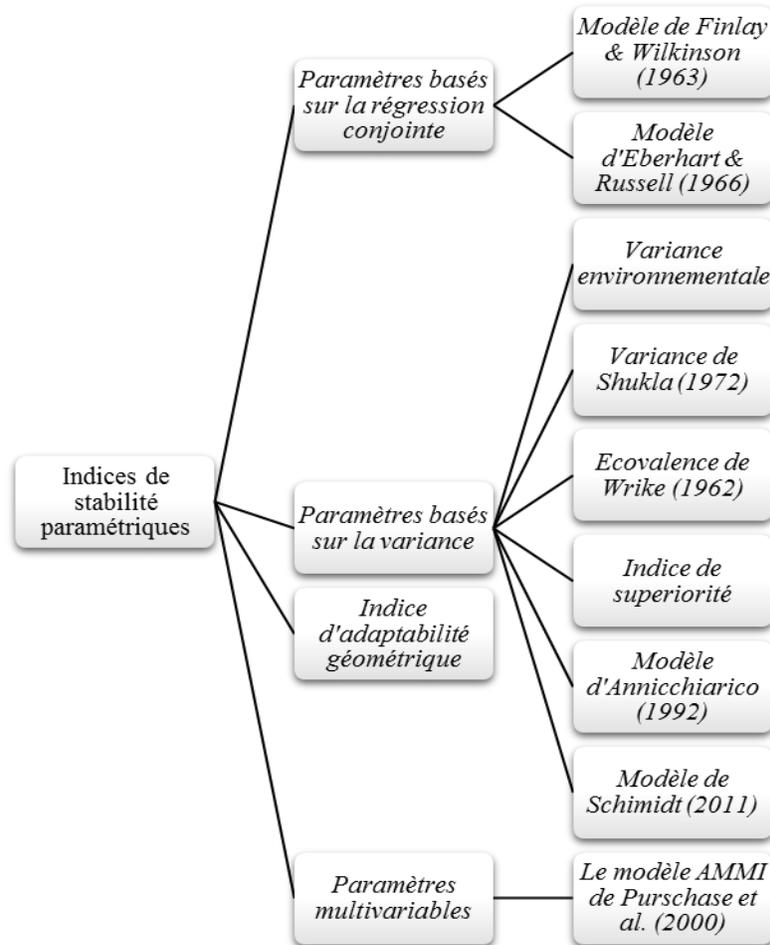


Figure 1. Indices de stabilité paramétriques utilisés dans la présente étude.

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels Genes (Cruz 2013) et GenStat 12 (2009).

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse de la variance et performance moyenne

L'analyse de la variance combinée a été effectuée pour déterminer les effets de l'environnement, du génotype et leurs interactions sur le rendement grains des six génotypes. Les résultats de cette analyse ont révélé des différences hautement significatives parmi les environnements ($p < 0.01$) et significatives pour l'interaction génotype x environnement ($p < 0.05$) pour le rendement en grains qui reflète une réponse différentielle des génotypes dans différents environnements. L'effet de l'environnement explique 70 % de la variation totale, l'interaction génotype x environnement explique 10 % de la variation et le génotype explique seulement 3 % (Tableau 1). Le pourcentage élevé de l'effet de l'environnement est une indication que le facteur majeur qui influence la performance des génotypes pour le rendement est le facteur milieu. Étant donné que l'interaction génotype x environnement (G x E) était significative, le rendement moyen du génotype a été soumis à différentes analyses de stabilité.

Tableau 1. Analyse de la variance combinée.

SV	ddl	S. Carré	C. Moyen	F-test	% S. Carré
Blocs	2	38625.74	19312.87		
Génotype	5	172526.04	34505.21 ^{ns}	1.29	03.0
Environnement	4	3621154.82	905288.71 ^{**}	33.84	70.0
G x E	20	535081.72	26754.09 [*]	2.11	10.0
Erreur	58	734828.23	12669.45		14.0

Total 89 5102216.55

ns,*,** : effet non significatif et significatif à 5% et significatif à 1%, respectivement.

La performance relative des génotypes basée sur le rendement en grains moyen dans tous les environnements indique que le génotype Waha occupe le premier rang suivi par Ofanto. Le génotype Guemgoum Rkhem est le moins performant (Tableau 2). En absence de l'interaction G x E, les moyennes des rendements à travers les environnements sont des indicateurs adéquats de la performance génotypique. Si l'interaction G x E est présente, les moyennes à travers les environnements ne nous renseignent pas comment les génotypes se distinguent pour la performance relative sur tous les environnements.

3.2. Analyse de la stabilité

3.2.1. Stabilité basée sur l'analyse de la régression conjointe

Les procédures de Finlay & Wilkinson (1963) et Eberhart & Russell (1966) impliquent l'utilisation d'une régression conjointe où le rendement de chaque génotype est régressé sur le rendement moyen de l'environnement. Ces techniques sont très largement utilisées par les améliorateurs pour évaluer la stabilité génotypique. La performance du génotype est généralement exprimée par trois paramètres, le rendement moyen (Rdt_{moy}), le coefficient de régression (b_i) et la déviation ($\bar{S}^2 d_i$) de la régression.

Tableau 2. Rendement en grains moyen et indices statistiques paramétriques de la stabilité des variétés de blé dur évaluées.

Génotype	Rdt_{moy} rang	Indices paramétriques de stabilité								
		b_i	$\bar{S}^2_{di} \times 10^3$	$S^2_{xi} \times 10^3, CV$	W_i^2 (%), rang	$P_i \times 10^3$	$\omega_{i,Ann.G}$	$I_{i,Sch.G}$	$GAI \times 10^3$	AMMI (ASV)
Waha	501.3 (1)	0.76 ^{ns}	3.61 ^{ns}	15.95 (14%)	19.51 (4)	5.45	110.8 2	104.92	0.47	42.71
Zb/Fg	417.8 (4)	0.87 ^{ns}	11.03*	12.31 (26%)	27.45 (5)	14.77	82.97	75.92	1.60	50.93
Mexicali ₇₅	439.1 (3)	1.33 ^{ns}	8.10*	15.49 (20%)	34.19 (6)	14.19	79.68	72.32	1.55	61.40
Ofanto	443.4 (2)	1.00 ^{ns}	-1.45 ^{ns}	2.50 (11%)	4.66 (2)	8.82	97.85	94.66	1.76	18.00
Gta dur	374.9 (5)	1.01 ^{ns}	2.69 ^{ns}	8.35 (22%)	11.62 (3)	19.74	75.11	70.37	1.36	10.97
Guemgoum Rkhem	374.2 (6)	1.04 ^{ns}	-2.78 ^{ns}	4.39 (17%)	2.57 (1)	18.54	69.41	70.86	0.47	16.29
Moyenne générale	425.10									

Rdt_{moy} : rendement en grains moyen, b_i : coefficient de régression conjointe de Finlay & Wilkinson (1963), \bar{S}^2_{di} : carré moyen de la déviation d'Eberhart & Russell (1966), S^2_{xi} : variance environnementale de Shukla (1972), W_i^2 (%): ecovalence de Wricke (1962), P_i : indice de superiorité, $\omega_{i,Ann.G}$: indice de stabilité d'Annicchiarico (1992), $I_{i,Sch.G}$: indice de stabilité de Schimidt *et al.* (2011), GAI : indice d'adaptabilité géométrique, $AMMI$ (ASV): valeur de stabilité de l'AMMI.

Les coefficients de régression se rangent de 0.76 à 1.33 (Tableau 3). Les génotypes Ofanto, Mexicali₇₅, Gta dur et Guemgoum Rkhem ont un coefficient de régression supérieur à l'unité ($b_i > 1$). Par contre, Waha et Zb/Flamingo ont un coefficient de régression qui est inférieur à l'unité ($b_i < 1$). Le carré moyen de déviation à la droite de régression ($\bar{S}^2 d_i$) a varié de -1.45 à 11.03. La régression conjointe de la performance génotypique moyenne sur l'indice l'environnemental a montré que les résultats des deux paramètres de stabilité (b_i) et ($\bar{S}^2 d_i$) n'étaient pas

consistant en évaluant la réaction des génotypes face à la variation des conditions environnementales. Les six génotypes ont un coefficient de régression qui ne dévie pas significativement de l'unité mais, en revanche, certains génotypes ont montré une déviation de régression (\bar{S}^2d_i) significative (Tableau 3). Ainsi, en se basant sur les coefficients de régression, tous les génotypes ont une réponse moyenne pour tous les environnements testés. Selon Becker et Leon (1988), les génotypes avec des valeurs du coefficient (b_i) proche de l'unité montrent une réponse moyenne aux variations des conditions environnementales. Eberhart & Russell (1966) et Finlay & Wilkinson (1963) ont trouvé que les génotypes ayant une performance moyenne élevée, un coefficient de régression ($b_i = 1$), et une déviation moyenne de la régression ($\bar{S}^2d_i = 0$) montrent une adaptabilité générale élevée à travers les environnements. Ainsi, les génotypes Waha, Ofanto et Mexicali₇₅ ayant des performances de rendement en grains supérieures à la moyenne générale, des valeurs de coefficient de régression qui ne dévient pas significativement de l'unité, et des valeurs de la déviation moyenne de la régression (\bar{S}^2d_i) non significativement différents de zéro, sauf pour Mexicali₇₅, se sont avérés plus stables que les autres génotypes.

3.2.2. Stabilité basée sur l'analyse de la variance

3.2.2.1. La variance environnementale

En présence des stress abiotiques variables en intensité et durée, le génotype désirable est celui qui donne une production régulière et une bonne performance de rendement dans la région pour laquelle il est destiné (Kadi, 2012). La variance environnementale (S^2_i) est l'une des mesures principales de stabilité pour le concept statique de la stabilité (Sisay, 2013), c'est-à-dire, la variance des rendements du génotype enregistrée à travers les environnements testés. Plus petite est la valeur de la variance (S^2_i), plus le génotype est stable. Les variances des génotypes et leurs coefficients de variation respective sont listés sur le tableau 2. En se basant sur ces deux mesures, les génotypes Ofanto, Guemgoum Rkhem et Gta dur peuvent être considéré relativement plus stable.

Parmi ces génotypes Ofanto a eu un rendement grain moyen de 443.4 g m⁻² qui est supérieur au grand rendement moyen général, en revanche les génotypes Gta dur et Guemgoum Rkhem ont eu respectivement 374.9 g m⁻² et 374.2 g m⁻² qui sont en dessous de la moyenne générale. Le problème avec cette méthode est que, en général, les génotypes ayant une stabilité phénotypique élevée mesurée à travers la variance environnementale montrent un faible rendement. Sisay (2013) a signalé des résultats similaires chez le blé tendre.

3.2.2.2. La variance de stabilité de Shukla

Les valeurs de la variance de stabilité de Shukla (1972) sont données sur le tableau 2. Les génotypes stables selon ce paramètre de stabilité sont Guemgoum Rkhem, Ofanto et Gta dur et les génotypes de faible stabilité sont Zb/Flamingo et Mexicali₇₅. Ofanto, Gta dur et Guemgoum Rkhem sont classés, respectivement, pour le rendement moyen second, cinquième et sixième. Le génotype Waha avec une stabilité intermédiaire est classé premier pour le rendement moyen.

3.2.2.3. Le model de Wricke

Wricke (1962) a défini le concept d'écovalence, pour décrire la stabilité d'un génotype, comme la contribution de chaque génotype à la somme des carrés de l'interaction génotype x environnement. L'écovalence (W_i) ou la stabilité du génotype (i) est la somme carrée de son interaction avec l'environnement. Les génotypes avec de faibles valeurs d'écovalence ont moins de fluctuations à travers les environnements et ainsi ils sont considérés comme stables. Les génotypes les plus stables selon cette méthode sont Guemgoum Rkhem, Ofanto et Gta dur. Ces génotypes, mis à part Ofanto, n'étaient pas les mieux classés pour le rendement moyen, étant 6^{ème}, 2^{ème} et 5^{ème}, respectivement. Les génotypes instables sont Waha, Zb/Flamingo et Mexicali₇₅. Ces génotypes étaient classés pour le rendement moyen 1^{er}, 4^{ème} et 3^{ème}, respectivement.

3.2.2.4. L'indice de supériorité (P_i)

L'indice de la supériorité (P_i) est une estimation de l'adaptabilité du génotype sur une gamme d'environnements. Il est calculé en utilisant le génotype à rendement élevé dans chaque environnement comme point de référence. Les génotypes ayant la plus grande différence de rendement par rapport au génotype de référence auraient la plus haute valeur de P_i (Lin et Binns 1988). Les génotypes les plus intéressants seraient ceux avec les valeurs de P_i les plus faibles, dont la plus part seraient attribués à l'écart génétique (Lin et Binns, 1988). En conséquence, seuls les génotypes Waha et Ofanto avaient les performances de rendement modérées à élevées et les valeurs de P_i les plus faibles (Tableau 2). Selon Crossa et al. (2002), cet indice intègre les notions de performance et de stabilité.

Cependant la stabilité et le potentiel de performance sont mesurés par rapport au meilleur génotype par environnement et non pas par rapport à la moyenne de l'ensemble des génotypes testés.

3.2.2.5. Le model d'Annicchiarico

Dans la méthode proposée par Annicchiarico (1992), la mesure de la stabilité est donnée par la supériorité du génotype comparée à la moyenne de chaque environnement. Cette méthode est basée sur l'estimation d'un indice de confiance, qui mesure la probabilité que la performance d'un génotype donné est supérieure aux autres (Vasconcelos *et al.*, 2010). Elle permet aussi de classer les environnements selon un indice soit en un environnement favorable ou défavorable (Tableau 3).

Tableau 3. Classement des environnements.

Environnement	Rdt _{moy} (g m ⁻²)	Indice	Classe
E1	775.15	350.05	Favorable
E2	367.36	-57.75	Défavorable
E3	432.59	7.49	Favorable
E4	398.31	-26.79	Défavorable
E5	152.09	-273.01	Défavorable

Les résultats pour les conditions de l'environnement général sont présentés sur le tableau 2. Il ressort que, dans les conditions de l'environnement général, le génotype Waha a enregistré une performance de 10.82 % plus élevée que la moyenne environnementale (avec une probabilité de 75 %), avec un indice de confiance (ω_i) le plus élevé (tableau 2). Ainsi selon cette méthode ce génotype présente une meilleure adaptabilité. Pour les conditions des environnements favorables les valeurs de l'indice de confiance (ω_i) étaient élevées pour les génotypes Waha, Zb/Flamingo et Ofanto (92.85, 91.32 et 90.69 %, respectivement) (tableau 4). Pour les conditions défavorables, les valeurs (ω_i) étaient élevées pour les variétés Waha et Ofanto (122.49 et 105.34, respectivement). Par les résultats obtenus par la méthodologie d'Annicchiarico (1992), on a vérifié que les variétés Waha et Ofanto ont une adaptation spécifique aux environnements défavorables ; bien que ces deux variétés se classent aussi en premier dans les environnements favorables (Tableau 4).

3.2.2.6. Le model de Schmidt

La méthode de Schmidt *et al.* (2011) est une amélioration de la méthode d'Annicchiarico (1992) dont l'intervalle de confiance est à 95 % au lieu de 75 %. Les résultats pour l'environnement général classe la variété Waha en première position suivie de Ofanto avec des valeurs de 104.92 et 94.66 %. On peut dire qu'avec un intervalle de confiance de 95 % le génotype Waha sera 4.92 % supérieur à la moyenne des environnements. Pour les environnements favorables, aucun génotype n'a dépassé la moyenne des environnements. Pour les environnements défavorables, la performance Waha dépasse de 18.49 % la moyenne des environnements suivis par Ofanto avec 2.69 % (Tableau 5).

Tableau 4. Les mesures du rendement en grains, de l'écart type des valeurs de pourcentage du rendement comparées au moyen des environnements et de l'indice de confiance (ω_j) selon Annicchiarico (1992).

Environnement	Mesure	Moyenne	Génotypes					
			G1	G2	G3	G4	G5	G6
Favorable $\alpha = 0.75$ $z = 0.675$	Rdt	603.87	654.13	643.28	652.4	593.35	533.67	546.4
	Rdt (%)	100	114.87	112.95	102.90	96.52	84.40	88.37
	Déviation (%)		32.62	32.05	25.64	8.65	19.83	10.55
	ω_i		92.85	91.32	85.59	90.69	71.01	81.25
Défavorable $\alpha = 0.75$ $z = 0.675$	Rdt	305.92	399.38	267.40	296.91	343.42	269.02	259.39
	Rdt (%)	100	132.39	92.03	94.50	111.90	88.47	80.72
	Déviation (%)		14.66	23.59	32.87	9.72	19.93	16.74
	ω_j		122.49	76.10	72.32	105.34	75.01	69.41

Tableau 5. Les mesures du rendement en grains, de l'écart type des valeurs de pourcentage du rendement comparées au moyen des environnements et de l'indice de confiance (ω_i) selon Schmildt *et al.* (2011).

Environnement	Mesure	Moyenne	Génotypes					
			G1	G2	G3	G4	G5	G6
Favorable $\alpha = 0.05$ $t(\alpha) = 2.12$	Rdt	603.87	654.13	643.28	652.40	593.35	533.67	546.4
	Rdt (%)	100	114.87	112.95	102.90	96.52	84.40	88.38
	Déviation (%)		32.62	32.05	25.64	8.65	19.83	10.55
	ω_i		83.94	82.57	78.59	88.32	65.60	78.37
Défavorable $\alpha = 0.05$ $t(\alpha) = 2.12$	Rdt	305.92	399.38	267.40	296.91	343.42	269.02	259.39
	Rdt (%)	100	132.39	92.028	94.50	111.90	88.46	80.72
	Déviation (%)		14.66	23.59	32.87	9.7186	19.929	16.74
	ω_i		118.49	69.659	63.34	102.69	69.570	64.84

De cette étude, il ressort que les deux méthodes aboutissent presque aux mêmes résultats et le classement des génotypes ne change pas. Les méthodes d'Annicchiarico (1992) et de Schmildt *et al.* (2011) ont permis une interprétation facile, basée sur l'analyse d'un seul paramètre, et ont également permis de classer les génotypes les plus adaptés et les plus stables.

3.2.3. L'indice d'adaptabilité géométrique

L'indice d'adaptabilité géométrique (GAI) a été largement utilisé pour évaluer l'adaptabilité des génotypes (Mohammadi *et al.*, 2008). Selon cet indice, le génotype Ofanto enregistre la valeur la plus élevée (Tableau 2) et par conséquent il est le plus stable, par contre les génotypes Guemgoum Rkhem et Waha sont identifiés comme instables.

3.2.4. Paramètres multivariés

Les techniques multivariées sont largement utilisées dans l'analyse de la stabilité pour fournir des informations sur la réponse des génotypes aux environnements. Le modèle AMMI est l'une de ces techniques puissantes pour l'évaluation de l'interaction génotype x environnement, la stabilité et l'adaptabilité des génotypes testés dans les essais multi-environnements. Le modèle AMMI est essentiellement efficace lorsque l'hypothèse de la linéarité des réponses du génotype à un changement de l'environnement n'est pas réunie, ce qui est important dans l'analyse de stabilité.

3.2.4.1. Les effets moyens additifs et l'interaction multiplicative (AMMI)

L'analyse de variance combinée des six génotypes évalués durant les cinq campagnes agricoles selon le modèle AMMI indique des différences hautement significatives ($p < 0.01$) pour les environnements, significative ($p < 0.05$) pour les génotypes et l'interaction génotype x environnement (Tableau 6), ceci indique que toutes les sources de variation sont importantes. Les composantes principales de l'interaction des axes (IPCA) sont ordonnées selon l'importance décroissante. Le *F*-test est hautement significatif ($p < 0.01$) pour le premier axe IPCA1 et non significatif pour le second axe IPCA2. La variation totale est expliquée à 3.38 % par l'effet génotype, 70.97 % par l'environnement, 10.49 % par l'interaction génotype x environnement. La majorité de la variation (88.39 %) de l'interaction génotype x environnement est expliquée par les deux premières composantes IPCA1 (73.44 %) et IPCA2 (14.95 %), tableau 6. Le pourcentage élevé pour l'environnement est une indication que le facteur principal qui influence la performance du rendement de blé dur en Algérie est l'environnement. Les tableaux 6 et 7 présentent les données de l'analyse AMMI avec les scores des IPCA1 et IPCA2 pour les génotypes et les cinq environnements.

Tableau 6. L'analyse de la variance basée sur le model AMMI pour le rendement en grains.

SV	ddl	S. Carré	C. Moyen	F-test	% S. Carré
Blocs	10	113869	11387	0.86	2.23
Traitement	29	4328747	149267	11.32**	84.84
Génotype	5	172514	34503	2.62*	3.38
Environnement	4	3621177	905294	79.5**	70.97
G x E	20	535057	26753	2.03*	10.49
IPCA1	8	392926	49116	3.72**	73.44⊗
IPCA2	6	79979	13330	1.01 ^{ns}	14.95⊗
Résiduelle	6	62151	10359	0.79	
Erreur	50	659496	13190		
Totale	89	5102112	57327		

⊗: pourcentage par rapport à la S. Carré de l'interaction; ns *, **: non significatif et significatif à 5% et 1%, respectivement.

Tableau 7. Rendement moyen et scores IPCA1 et IPCA2 pour les cinq environnements.

Environnement	Rendement moyen	IPCA1	IPCA2
E1	775.1	-10.56824	-1.48264
E2	367.4	7.98531	-8.21058
E3	432.6	10.27108	8.49250
E4	398.8	-8.91377	3.82701
E5	152.1	1.22563	-2.62630

Le biplot des deux premières composantes principales a été construit et utilisé pour illustrer les relations existantes parmi les génotypes et les environnements. La projection orthogonale des génotypes sur les vecteurs d'environnement indique la performance relative des génotypes dans un environnement donné ; plus grande est la projection du génotype dans la direction positive, meilleure est la performance de ce génotype dans cet environnement. En traçant sur le même graphique à la fois, les scores des génotypes et des environnements, les associations entre les génotypes et les environnements peuvent être vue plus clairement. Dans l'analyse AMMI, les scores IPCA d'un génotype sont une indication de la stabilité ou de l'adaptation de celui-ci dans tous les environnements (Gauch et Zobel, 1996). Selon Crossa *et al.* (1990), les valeurs élevées des scores des génotypes (positives ou négatives) indiquent une adaptation spécifique aux environnements proches de la position du génotype considéré. Les scores des axes dont les valeurs sont proches de zéro indiquent une adaptation plutôt générale à tous les environnements. Plus le positionnement sur le graphe d'un génotype ou d'un environnement est loin du centre des axes, plus l'interaction G x E est grande.

Dans la figure 2, les scores de l'IPCA1 pour le génotype et les environnements ont été tracés contre le rendement moyen pour les génotypes et les environnements, respectivement. De ce graphe il ressort que les environnements testés classent les génotypes évalués différemment. Ainsi les environnements E1 et E4 s'opposent aux environnements E2 et E3 et de par la taille de leurs scores élevés, ces environnements sont les plus interactifs. Le biplot AMMI 2 généré à partir des scores des deux premiers axes IPCA1 et IPCA2 a montré une association claire entre les génotypes et les environnements (Figure 3). Le biplot a montré que l'environnement E3 et l'environnement E2 sont les plus discriminants pour les génotypes comme indiqué par la distance la plus longue entre leurs positions et le point d'origine. Cependant, en raison de leurs scores élevés, la variabilité des génotypes dans ces environnements peut ne pas refléter exactement les performances moyennes des génotypes. Le biplot AMMI2 a également indiqué la relation entre les génotypes évalués. Par leurs positions éloignées du centre, les génotypes Zb/Flamingo (G2), Mexicali₇₅ (G3) et Gta dur (G5) sont différents des autres génotypes du biplot. Ils sont aussi instables.

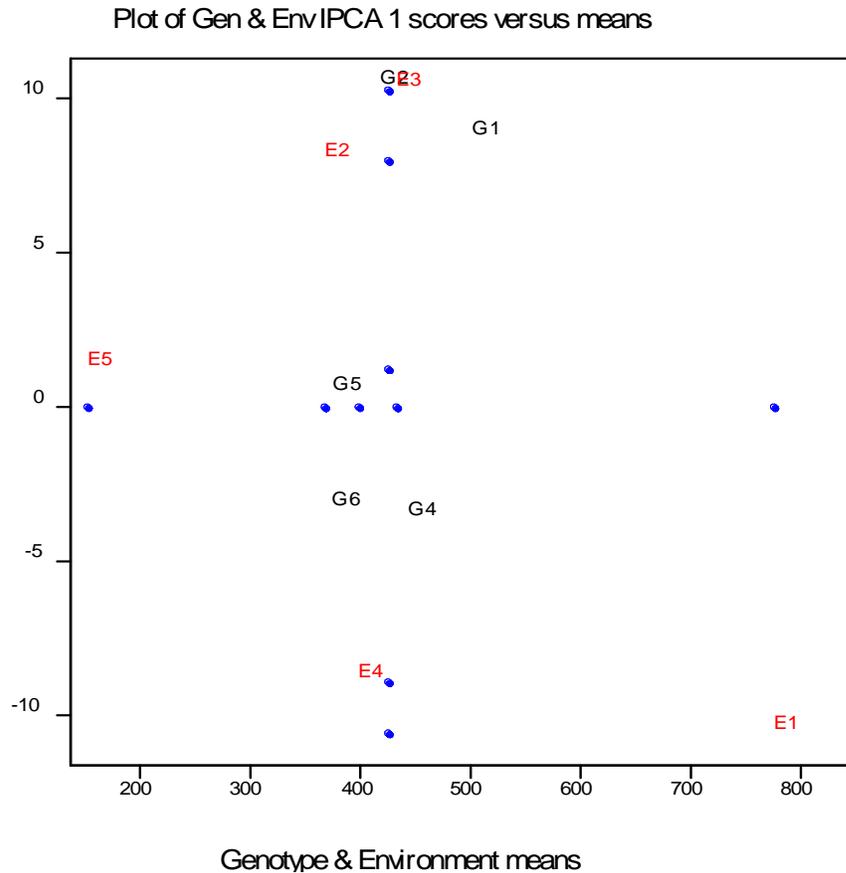


Figure 2. AMMI 1 rendement en grains moyen des génotypes et des environnements et leurs scores IPCA1.

Les génotypes Waha (G1), Ofanto (G4) et Guemgoum Rkhem (G6) ont été positionnés plus près du point d'origine du biplot, ce qui indique leur stabilité dans la performance à travers les environnements. La direction de Guemgoum Rkhem (G6) montre la stabilité du génotype dans un environnement à faible rendement, tandis que Ofanto (G4) montre la stabilité dans un environnement à rendement élevé. Mohammadi et Amri (2008) dans une étude de l'interaction génotype x environnement chez le blé dur ont révélé que les génotypes qui sont loin du centre de biplot, ont une interaction G x E élevée et ceux plus proches du centre de biplot sont plus stable. Les résultats de la présente étude corroborent avec ceux de Sissay (2013), Mohammadi (2016) et Haddad (2017). Les environnements ayant un rendement élevé sont E1 et E3 ; par contre, les environnements E2, E4 et E5 marquent le plus faible rendement (Tableau 8).

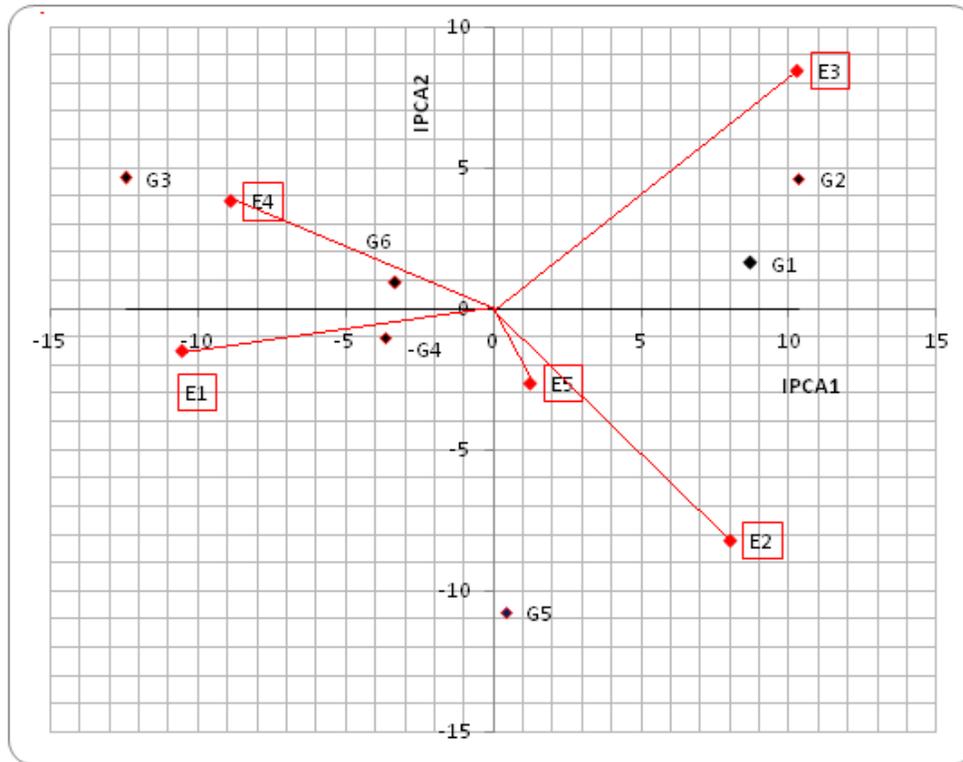


Figure 3. L'interaction G x E basée sur le biplot AMMI2 pour les deux axes IPCA1 et IPCA2.

Tableau 8. Classement des génotypes par environnement.

Génotype	E1	E2	E3	E4	E5
Waha (G1)	4	1	1	3	1
Zb/Flamingo (G2)	6	3	2	5	3
Mexicali ₇₅ (G3)	1	6	4	1	4
Ofanto (G4)	2	4	3	2	2
Gta dur (G5)	5	2	6	6	5
Guemgoum Rkhem (G6)	3	5	5	4	6

Les génotypes ayant un rendement supérieur au rendement moyen sont Waha, Zb/Flamingo, Mexicali₇₅ et Ofanto, en revanche, les génotypes Gta dur et Guemgoum Rkhem, leur performance est au-dessous de la moyenne générale. Sur le tableau 9, sont présentés les classements des estimations AMMI pour les génotypes par environnement. Ainsi les génotypes Waha et Ofanto sont les mieux classés. Waha et Ofanto sont classés premier et second, respectivement, dans trois environnements sur cinq et par conséquent sont les plus stables. L'analyse AMMI donne aussi les quatre premiers génotypes sélectionnés par environnement. En effet, le génotype Waha (G1) se classe premier dans trois environnements, le génotype Mexicali₇₅ (G3) se classe premier dans deux environnements et le génotype Ofanto (G4) se classe deuxième dans trois environnements.

Tableau 9. Les quatre premières sélections AMMI par environnement.

N° Env.	Environnement	Rdt _{moy}	Score	1	2	3	4
3	E3	432.6	10.271	G1	G2	G4	G3
2	E2	367.4	7.985	G1	G5	G2	G4
5	E5	152.1	1.226	G1	G4	G2	G3
4	E4	398.3	-8.914	G3	G4	G1	G6
1	E1	775.1	-10.568	G3	G4	G6	G1

3.2.4.2. La valeur de stabilité AMMI (ASV)

La valeur de stabilité AMMI développée par Purchase *et al.* (2000) est basé sur les scores IPCA1 et IPCA2 du model AMMI et calculé pour chaque génotype. En effet l'ASV est la distance entre la position du génotype considéré sur le plan formé par les axes IPCA1 et IPCA2 à l'origine. Les génotypes ayant les plus faibles valeurs de l'ASV sont les plus stables. Les valeurs de la stabilité AMMI (ASV) confirment les résultats des scores IPCA1 et IPCA2 (Tableau 2). Cependant, elles ont classé le génotype Gta dur (G5), Guemgoum Rkhem (G6) et Ofanto (G4) comme les plus stables, bien que les génotypes Guemgoum Rkhem et Gta dur aient les rendements le plus faibles (374.2 et 374.9 g m⁻², respectivement). Selon l'ASV, les génotypes les moins stables sont Mexicali₇₅ (G3), Zb/Flamingo (G2) et Waha (G1). Sabaghnia *et al.* (2013) et Mohammadi *et al.* (2015), en étudiant la stabilité de vingt génotypes de blé dur ont mentionné que le model AMMI est l'outil le plus efficace pour l'étude de la complexité de l'interaction génotype x environnement.

4. Conclusion

La présente étude a été menée afin d'analyser l'interaction génotype x environnement et d'étudier la stabilité du rendement de six génotypes de blé dur durant cinq campagnes agricoles. L'analyse de la variance combinée a montré un effet significatif de l'interaction G x E, de plus les effets de l'environnement étaient hautement significatifs. De ces résultats il a été conclu que le principal facteur qui influence les rendements du blé dur est l'environnement. Cela implique la nécessité d'étudier la réponse différentielle des génotypes aux différents environnements. Plusieurs méthodes paramétriques ont été employées dans cette étude pour quantifier la stabilité du rendement. L'étude comparative de ces méthodes a permis d'identifier les génotypes Ofanto et Guemgoum Rkhem comme stables. Ofanto est très intéressant car il détient à la fois la performance du rendement et la stabilité. Par contre, Guemgoum Rkhem quoi qu'il soit stable, sa performance du rendement est la plus faible parmi les génotypes étudiés. La stabilité en soi ne devrait pas être le seul critère de sélection, car les génotypes les plus stables ne donneraient pas nécessairement la meilleure performance, il faut donc des approches qui intègrent simultanément le rendement en grains et la stabilité dans un seul index.

Références bibliographiques

- Adjabi, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A. 2014. Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Grain Yield. *Journal of Agronomy*, 13: 131-139.
- Annicchiario, P. 1992. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Genetics and Breeding*, 46: 269-278.
- Annicchiario, P., Bellah, F. and Chiari, T. 2005. Defining sub regions estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop science*, 45: 1741-1749.
- Becker, H.C. and Leon, J. 1988. Stability analysis in plant breeding, *Plant Breeding*, 101: 1-23.
- Bendjama, A., Bouzerzour, H. and Benbelkacem, A. 2014. Adaptability of Durum Wheat Genotypes (*Triticum turgidum* L. *Var durum*) to Contrasted Locations. *Australian Journal of Basic and Applied Science*, 8(6): 390-396.
- Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Oulmi, A. and Bouzerzour, H. 2010. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 14: 177-186
- Brancourt-Hulmel, M., Biarnès-Dumoulin, V. and Denis, J.B. 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plants. *Agronomie*, 17: 219-246.
- Crossa, J., Cornelius, P.L. and Yan, W. 2002. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype x environment interaction. *Crop Science*, 42: 619-633.
- Crossa, J., Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1990. Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis of Two International Maize Cultivar Trials. *Crop Science*, 30: 493-500.
- Cruz, C.D. 2013. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(3): 271-276.
- Eberhart, S.A. and Russel, W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6: 36-40.
- Finlay, K.W. and Wilkinson, G.H. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14: 742-754.
- Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1996. AMMI Analysis of Yield Trials. In: *Genotype by Environment Interaction*, Kang, M.S. & Gauch H.G. (Eds). Boca Raton CRC. New York, USA, 85-122.
- GenStat. 2009. GenStat for Windows (12th Edition) Introduction. VSN International, Hemel Hempstead, UK.

- Haddad, L. 2017. 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 Sétif 1, 183 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(3): 139-146.
- Kadi, Z. 2012. Sélection de l'orge (*Hordeum Vulgare* L.) pour la tolérance aux stress abiotiques. *Thèse de doctorat sciences, Université Sétif 1*, 134 pages.
- Kadi, Z., Adjel, F. and Bouzerzour, H. 2010. Analysis of the genotype × environment interaction of barley grain yield (*Hordeum Vulgare* L.) under semi-arid conditions. *Advances in Environmental Biology*, 4:30-40.
- Lin, C.S., Binns, M.R. and Lefkovich, L.P. 1986. Stability analysis: Where do we stand? *Crop Science*, 26: 894-900.
- Lin, C.S.; Binns, M.R. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68: 193-198.
- Mekhlouf, A., Dehbi F., Bouzerzour, H., Hannachi, A., Benmahammed, A. and Adjabi, A. 2006. Relationships between cold tolerance, grain yield performances and stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown at high elevation area of Eastern Algeria. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5: 700-708.
- Menad, A., Meziani, N., Bouzerzour, H. and Benmahammed, A. 2011. Analyse de l'interaction génotype x milieux du rendement de l'orge (*Hordeum Vulgare* L.): application des modèles AMMI et la régression Conjointe. *Nature & Technologie*, 5 99-106.
- Meziani, N., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Menad A. and Benbelkacem, A. 2011. Performance and Adaptation of Barley Genotypes (*Hordeum Vulgare* L.) to Diverse Locations. *Advances in Environmental Biology*, 5(7): 1465-1472.
- Mohammadi, M., Sharifi, P., Karimzadeh, R., Alt Jafarby, J., Khanzadeh, H., Houseinpour T., Mahi Poursiabidi M., Roustataii, M., Hassanpour Hosni, M. and Mohammadi, P. 2015. Stability of grain yield of durum wheat genotypes by AMMI model. *Agriculture & Forestry*, 61(3): 181-193.
- Mohammadi, R. and Amri, A. 2008. Comparison of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in variable environments. *Euphytica*, 159: 419-432.
- Mohammadi, R. 2016. Interpretation of genotype × year interaction in rainfed durum wheat under moderate cold conditions of Iran, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 45(1): 55-74.
- Mohammadi, R., Abdulahi, A. and Amri, A. 2008. Repeatability of some agronomic traits in durum wheat. *International Journal of Plant Breeding*, 2: 39-42.
- Nouar, H., Bouzerzour, H., Haddad, L., Menad, M., Hazmoune, H. and Zerargui, H. 2012. Genotype × environment interaction assessment in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) using AMMI and GGE models. *Advances in Environmental Biology*, 6: 3007-3015.
- 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 Boussalam dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture*, 54: 23-28.
- Prost, L., Lecomte, C., Meynard, JM. et Cerf, M. 2007. Conception d'un outil d'analyse du comportement de systèmes biologiques : le cas de l'évaluation des variétés de blé tendre. *Activités*, 4: 30-53.
- Sabaghnia, N., Mohammadi, M. and Karimizadeh, R. 2013. Parameters of AMMI model for yield stability analysis in durum wheat. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 78(2): 119-124.
- Schmidt, E.R., Nascimento, A.L., Cruz C.D. and Oliveira, J.A.R. 2011. Evaluation of methodologies of adaptability and stability in corn cultivars. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(1): 51-58.
- Shukla, G.K. 1972. Some aspects of partitioning genotype x environmental components of variability. *Heredity*, 29: 237-245.
- Sisay, A. 2013. Comparison of parametric and non parametric methods to describe genotype by environment interaction and grain yield stability of bread wheat. *Master Thesis Addis Ababa University College of natural science department of statistics, Ethiopia*.
- Vasconcelos, E.S., Reis, M.S., Cruz, C.D., Sediya, T. and Scapim C.A. 2010. Adaptability and stability of semi-late and late maturing soybean genotypes in Minas Gerais state. *Acta Scientiarum. Agronomy Maringá*, 32(3): 411-415.
- Wricke, G. 1962. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzücht*, 47: 92-96.