



THESE

N° :/SNV/2025

Présenté Par

Benkadja Sarah

Pour l'obtention du diplôme

DOCTORAT 3^{EME} CYCLE (L.M.D)

Filière : Agronomie

Spécialité : Amélioration des plantes

THEME

Etude comparative de quelques variétés de blé dur
(*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides.

Soutenu publiquement le : 11/02/ 2025

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Qualité	Grade	Etablissement
Benmahammed Amar	Président	Professeur	UFA Sétif 1
Oulmi Abdelmalek	Directeur de thèse	Professeur	UFA Sétif 1
Guendouz Ali	Co-directeur de thèse	Directeur de Recherche	INRAA Sétif
Bahlouli Fayçal	Examineur	Professeur	UMBI BBA
Mekhlouf Abdelhamid	Examineur	Professeur	UFA Sétif 1
Benderradji Laid	Examineur	Professeur	UMB M'slia

Année universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل مدى فعالية المؤشرات الفيزيولوجية والزراعية لانتخاب التراكيب الوراثية المتكيفة مع البيئات الشبه الجافة، من ناحية أخرى، فإننا نستكشف مدى تأثير الإجهاد التأكسدي المحفز باستعمال مبيد الأعشاب الغليفوسات على أنماط جينية مختلفة من القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) لفهم آليات التأقلم والتكيف بشكل جيد وتحديد الأنماط الجينية الأكثر تكيفاً مع هذه الظروف الصعبة. تم تقييم مجموعة من عشرة تراكيب وراثية من القمح الصلب خلال موسمين زراعيين 2021-2022 و 2022-2023. تمت الدراسة على مستوى الحقول التجريبية التابعة للمعهد التقني للزراعات الواسعة بولاية سطيف. أظهرت نتائج تقييم الاستجابات الزراعية والفيزيولوجية للتراكيب الوراثية المختبرة على مدى موسمين أن تأثير النمط الوراثي كان معنوياً في غالبية المؤشرات المدروسة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ وجود تفاعل كبير بين التراكيب الوراثية والموسم الزراعي. تشير هذه النتائج إلى أن الاختلافات المناخية بين الموسمين الزراعيين لها تأثير كبير على المردود الحي ومركباته، كما يؤثر على العديد من الوظائف الفيزيولوجية المختلفة. أثبت الموسم 2021-2022 أنه الأكثر ملائمة للتعبير عن أغلبية المؤشرات المدروسة. أظهرت الأنماط الجينية G3 (35.23 ق/هـ)، G2 (34.86 ق/هـ) و G5 (28.9 ق/هـ) أعلى مردود حي؛ إضافة إلى ذلك، حافظت هذه الأنماط الوراثية على أعلى مستويات من المحتوى المائي (81.09%) و 84.95% و 84.34% على التوالي) وأقل درجات حرارة للأوراق تحت هذه الظروف. يحفز مبيد الأعشاب الغليفوسات الإجهاد التأكسدي والذي يمكن أن يؤدي إلى تلف الخلايا وبالتالي تحفيز النظام الدفاعي الذي يؤدي إلى تراكم العديد من الجزيئات الدفاعية. تشير نتائجنا إلى أن الأنماط الجينية G1 و G3 حساسة بشكل خاص لهذا الإجهاد التأكسدي، حيث تتراكم فيها مستويات عالية من المالونديالدهيد. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ انخفاض كبير في محتوى الكلوروفيل في الصنف المحلي بوطالب مقارنة بباقي التراكيب الوراثية. أظهرت السلالات G5، G3، G4، و Jupare C 2001، واد البار و بوسلام قدرة كبيرة على تجميع البرولين والسكريات القابلة للذوبان مما يمنحها قدرة أفضل على تحمل الإجهاد التأكسدي. تعتبر مؤشرات الاستقرار في الانتاجية البارامترية وغير البارامترية مناسبة لانتخاب أنماط جينية مستقرة ومتكيفة للظروف الشبه الجافة. بالإضافة إلى ذلك أثبتت نتائج تحليل الاستقرار أن السلالات G1 و G6 و بوسلام تتميز بمردود حي أكثر ثباتاً في حين السلالتين G3 و واد البار تميزت بثبات وزن الألف حبة.

الكلمات المفتاحية: *Triticum durum* Desf.، الشبه الجافة، فيزيولوجية، زراعية، الإجهاد التأكسدي.

Résumé

La présente étude vise à analyser l'efficacité des critères physiologiques et agronomiques pour la sélection des génotypes adaptés aux environnements semi-arides. D'autre part, nous explorons l'impact du stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate sur les génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) pour mieux comprendre les mécanismes de tolérance et d'identifier des génotypes plus adaptés à ces conditions difficiles. Une collection de dix génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) a été évaluée pendant deux saisons de culture, 2021-2022 et 2022-2023, dans les champs expérimentaux de l'Institut Technique des Grandes Cultures, Sétif. Les résultats de l'évaluation des réponses agro-physiologiques des génotypes de blé sur deux saisons montrent que l'effet du génotype était significatif pour la majorité des paramètres étudiés. De plus, une interaction significative entre le génotype et l'année a été observée. Cela suggère que la variabilité climatique entre les deux années a un impact significatif sur le rendement en grain et ses composantes, influençant également divers processus physiologiques. La saison 2021-2022 s'est avérée la plus favorable pour l'expression de la plupart des paramètres. Les génotypes G3 (35,23 q ha⁻¹), G2 (34,86 q ha⁻¹) et G5 (28,9 q ha⁻¹) ont affiché les rendements les plus élevés. De plus, ils ont maintenu les niveaux de teneur en eau les plus élevés (81,09 %, 84,95 % et 84,34 % respectivement) et les températures foliaires les plus basses dans ces conditions. L'herbicide glyphosate induit un stress oxydatif, pouvant entraîner des altérations cellulaires et déclencher ainsi le système de défense qui accumule divers osmolytes protecteurs. Nos résultats indiquent que les génotypes G1 et G3 sont particulièrement sensibles à ce stress oxydatif, accumulant des teneurs élevées en malondialdéhyde. De plus, une forte diminution de la teneur en chlorophylle a été observée chez la variété locale Boutaleb. Les génotypes G5, G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared et Bousselam ont montré une grande capacité à accumuler la proline et les sucres solubles, leur conférant ainsi une meilleure tolérance au stress oxydatif. Les indices paramétriques et non paramétriques sont appropriés pour la sélection des génotypes stables et adaptés dans les régions semi-arides. De plus, les génotypes G1, G6 et Bousselam se distinguent par un rendement en grains plus stable ainsi que les génotypes G3 et Oued el bared affichent une stabilité pour le poids de mille grains.

Mot clés : *triticum durum* Desf., semi ride, physiologique, agronomique, stress oxydatif.

Abstract

The present study aims to analyze the efficiency of physiological and agronomic criteria for selecting genotypes adapted to semi-arid environments. On the other hand, we are exploring the impact of oxidative stress induced by the herbicide glyphosate on durum wheat (*triticum durum* Desf.) genotypes to understand the mechanisms of tolerance better and to identify genotypes more adapted to these difficult conditions. A collection of ten durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) was evaluated during two growing seasons, 2021-2022 and 2022-2023, in the experimental fields of the Technical Institute of Field Crops, Sétif. The results of the evaluation of the agro-physiological responses of wheat genotypes over two seasons show that the effect of the genotype was significant for the majority of the parameters studied. Additionally, a significant interaction between genotype and year was observed. This suggests that climatic variability between the two years has a significant impact on grain yield and its components, also influencing various physiological processes. The 2021-2022 season proved to be the most favorable for the expression of most parameters. Genotypes G3 (35.23 q ha⁻¹), G2 (34.86 q ha⁻¹) and G5 (28.9 q ha⁻¹) showed the highest yields. Additionally, they maintained the highest water content levels (81.09%, 84.95%, and 84.34% respectively) and lowest leaf temperatures under these conditions. The herbicide glyphosate induces oxidative stress, which can lead to cellular damage and thus trigger the defense system which accumulates various protective osmolytes. Our results indicate that the G1 and G3 genotypes are particularly sensitive to this oxidative stress, accumulating high levels of malondialdehyde. In addition, a strong decrease in chlorophyll content was observed in the local variety Boutaleb. The G5, G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared, and Bousselam genotypes showed a great capacity to accumulate proline and soluble sugars, thus giving them better tolerance to oxidative stress. Parametric and non-parametric indices are suitable for the selection of stable and adapted genotypes in semi-arid regions. In addition, the G1, G6, and Bousselam genotypes are distinguished by a more stable grain yield as well and the G3 and Oued el bared genotypes display stability for the weight of a thousand grains.,

Keywords: *triticum durum* Desf, semi-arid, physiological, agronomic, oxidative-stress.

Liste des Abréviations

ABA : Acide abscissique

ACP : Analyse en composantes principales

ANOVA : Analyse de la variance

BIO : Biomasse aérienne

CHI : Teneur en chlorophylle

CIMMYT : Centre international d'amélioration du maïs et du blé

DE : Durée de la phase végétative

EC : Conductivité électrique

ERO : Espèce réactive d'oxygène

ha : Hectare

HT : Hauteur de la plante

ICARDA : Centre international de la recherche agricole dans les zones arides

INRAA : Institut national des recherches agronomiques d'Algérie

IR : Indice de la récolte

ITGC : Institut technique des grandes cultures

MADR : Ministère de l'agriculture et du développement rural

MDA : Malondialdéhyde

NEm⁻² : Nombre d'épis par mètre carré

NGE : Nombre de grains par épi

PMG : Poids de mille grains

Q : Quintal

RDT : Rendement en grains

SF : Surface foliaire

TCV : Température du couvert végétal

TRE : Teneur relative en eau

USDA : Ministère de l'Agriculture des États-Unis

r : coefficient de corrélation

SAU : surface agricole utile

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Le pedigree et l'origine des géotypes testés	27
2	Carrés moyens de l'analyse de la variance pour deux années des variables physiologiques mesurées.	32
3	Les valeurs moyennes des caractères physiologiques des géotypes testés	37
4	Carré moyennes de l'analyse de variance des paramètres agronomiques mesurées chez les géotypes testés.	38
5	Les valeurs moyennes, maximales et minimales et signification statistique des caractères agronomiques mesurés.	44
6	Les coefficients des corrélations entre les différents traits mesurés.	46
7	Valeurs propres, % de variance cumulée de ACP durant deux saisons.	47
8	Carrés moyens de l'analyse de la variance pour deux années des variables mesurées.	59
9	Variations de la teneur en malondialdéhyde, proline, et les sucres solubles des géotypes testés.	60
10	Teneur en chlorophylle de la feuille avant et après l'application de glyphosate, perte de chlorophylle (%), indice de sensibilité au glyphosate et vitesse de dégradation de la chlorophylle chez les géotypes testés.	67
11	La fuite relative d'électrolytes (%) de dix géotypes de blé dur soumis à un stress oxydatif.	69
12	Indices paramétriques de stabilité, rendement moyen (RDT, q. ha-1) et poids de mille grains (PMG, g) pour les géotypes de blé dur testés	77
13	Les indices non paramétriques de la stabilité pour les géotypes de blé dur testés.	78
14	Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les indices de stabilité utilisés et de rendement en grains.	79
15	Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les indices de stabilité et le poids de mille grains.	79

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Phylogénie des espèces de blé	4
2	La production et la consommation mondiales de blé dur (2015-2024)	5
3	Représentation de la balance entre les espèces réactive d'oxygène (ERO ou ROS) et le système antioxydant	9
4	Les différentes cibles des espèces réactives d'oxygènes (ERO ou ROS)	10
5	Le mesure de la teneur en chlorophylle à l'aide d'un appareil CCM-200 plus	28
6	Le mesure de la température à l'aide d'un thermomètre infrarouge portable (Fluke Corporation. Everett.WA. USA).	29
7	Températures moyennes mensuelle des deux années de culture 2021-2022 et 2022-2023	31

8	La distribution de la pluviométrie et la température moyenne mensuelle pour les deux saison 2021-2022 et 2022-2023.	32
9	A : Biplot des paramètres mesurés avec deux premiers composants de l'ACP, B : la distribution des génotypes sur le plan, F1, F2 pendant les deux années de culture	47
10	Écart par rapport aux valeurs moyennes du malondialdéhyde sous stress oxydatif dans les génotypes testés au cours des deux campagnes 2021-2022 et 2022-2023.	56
11	Écart par rapport aux valeurs moyennes de la teneur en proline sous stress oxydatif dans les génotypes testés au cours des deux saison 2021-2022 et 2022-2023.	58
12	Écart par rapport aux valeur moyenne de la teneur en sucres solubles sous stress oxydatif chez les génotypes durant les deux saisons 2021-2022 et 2022-2023.	59
13	La dégradation de la teneur en chlorophylle des génotypes de blé dur après application de glyphosate.	67
7	Biplot de AC1 et AC2 de la matrice de corrélation de rang des paramètres de stabilité avec le rendement en grains.	81
15	Biplot de AC1 et AC2 de la matrice de corrélation de rang des paramètres de stabilité avec le poids de mille grains.	81

Table des matières

REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
المخلص	
Résumé	
Abstract	
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1- L'origine génétique et géographique de blé dur	4
2- Les superficies et la production de blé	5
2-1 La production mondiale	5
2-2 La production en Algérie	6
4- Les contraintes abiotiques du milieu de production et son effet sur la plante	6
4-1 Le stress hydrique	6
4-2 Le stress thermique	8
4-3 Le stress oxydatif	8
4-3-1 Les espèces réactives d'oxygènes (ERO ou ROS)	9
4-3-2 L'impact des espèces réactives de l'oxygène et les dommages oxydatifs	10
5- Les critères de sélection du blé dur pour la tolérance aux stress abiotiques	12
5-1 Les critères phénologiques	12
5-2 Les critères morphologiques	12
5-3 Les critères physiologiques	13
5-4 Les critères biochimiques	14
5-4-1 La teneur en proline	14
5-4-2 Les sucres solubles	15
5-4-3 Les enzymes antioxydants	16
5-5 La sélection pour l'amélioration du rendement en grain	17
5-6 La sélection pour la stabilité du rendement en grains	17
5-6-1 Les approches statistiques pour l'évaluation de la stabilité du rendement et de l'adaptabilité	18
5-6-1-1 Les indices paramétriques	18
5-6-1-2 Les indices non paramétriques	19
5-7 La sélection assistée par marqueur moléculaire	20
Chapitre II : évaluation du comportement agro physiologique de Quelques génotypes de blé dur (<i>triticum durum</i> Desf.) Sous conditions Semi arides	
المخلص	22
Résumé	23
Abstract	24
Introduction	25
Materials et méthodes	26
1- Site de l'expérimentation	26
2- Le matériel végétal	26
3- Les suivis et notations	27
3 1- Les paramètres physiologiques	27
3-1-1- La teneur relative en eau (TRE)	27
3-1-2 La stabilité membranaire (MSI %)	27
3-1-3- La teneur en chlorophylle (CHL)	28
3-1-4 La température du couvert végétale (TCV)	28
3-1-5 La durée de la phase végétative (DPV)	29
3-1-6 La surface de la feuille étendard (SF)	29
3 2- Les paramètres agronomiques	29
3-2-1 Le rendement en grains (RDT, q. ha ⁻¹)	29
3-2-2 Le poids de mille grains (PMG, g)	30
3-2-3 le nombre d'épis/m ² (NE/m ²)	30
3-2-4 Le nombre des grainais par épis (NG/épi)	30
3-2-5 La biomasse arienne (BIO, q. ha ⁻¹)	30
3-2-6 L'indice de récolte (RI %)	30
3-2-7 La hauteur (HT, cm)	30
4- Analyse statistique	30
RESULTATS ET DISCUSSION	30

1- Analyse des données climatiques	30
1-1- La température	31
1-2 La pluviométrie	31
2- Evaluation des paramètres physiologiques	32
2-1 Détermination de la teneur relative en eau (TRE)	33
2-2 La teneur en chlorophylle totale	33
2-3 La stabilité membranaire	34
2-4 La température du couvert végétale	35
2-5 La surface foliaire	36
2-6 La durée de la phase végétative (DPV)	36
3- Performance agronomique des génotypes testés	38
3-1 Le rendement en grains	38
3-2 Le poids de mille grains.....	39
3-3 Le nombre d'épi/m ²	40
3-4 Le nombre des grains par épi.....	41
3-5 La biomasse aérienne totale.....	41
3-6 L'indice de récolte	42
3-7 La hauteur	43
4- Les corrélations entre les paramètres mesurés	45
5- Analyse en composante principale (ACP).....	46
CONCLUSION	47

Chapitre III analyse du comportement des génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) sous effet d'un stress oxydatif.

Partie 1 : peroxydation lipidique, teneur en proline et sucres solubles comme indicateurs de tolérance au stress oxydatif dans certains génotypes de blé dur (<i>triticum durum</i> Desf.)	49
المخلص.....	49
Résumé	50
Abstract	51
Introduction	52
Materials et méthodes.....	53
1- Matériel végétal et conditions de culture	53
2- Les paramètres évalués	53
2-1 La peroxydation des lipides	53
2-2 Teneur en proline	54
2-3 Les sucres solubles	54
Résultat et discussion	55
1- Evaluation de la peroxydation lipidique chez les génotypes testés	55
2- Teneur en proline	56
3- Les sucres solubles	58
Conclusion	60

Partie 2 : Évaluation de la teneur en chlorophylle et de la stabilité de la membrane sous stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate chez certains génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) : étude in vitro

المخلص.....	61
Résumé	62
Abstract	63
Introduction	64
Matériels et méthodes	65
1- Materials végétale et application de stress oxydant	65
Résultats et discussion	65
1- La dégradation de la teneur en chlorophylle	65
2- La Libération Relative d'électrolytes	68
Conclusion	69

Chapitre IV étude de la stabilité du rendement en grains et du poids de mille grains chez génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) sous conditions semi arides

المخلص.....	70
Résumé	71
Abstract	72
Introduction	73

Materials et méthodes	74
1- Le matériel végétal et les conditions expérimentales	74
2- Les paramètres mesurés	74
2-1 Les indices paramétriques	74
2-2 Les indices non paramétriques	74
3- Analyses statistiques	74
4- Analyse de la stabilité.....	75
Résultats et discussions	75
1- Les indices paramétriques de la stabilité	75
2- Les indices non paramétriques de la stabilité	77
3- Corrélations entre le rendement en grains, le poids du mille grains et les différents indices de stabilité	78
4- Analyse en composantes principales (ACP)	80
Conclusion	82
CONCLUSION GENERALE	83
Référence bibliographique	

Remerciement

Louanges à ALLAH, le tout puissant et le miséricordieux, pour m'avoir accordé la force, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, **Professeur Oulmi Abdelmalek** de l'université Sétif-1, pour son aide tout au long de ce parcours, ses conseils avisés, sa disponibilité et son dévouement, qui ont conduit à l'achèvement de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et de ma gratitude

J'exprime également ma profonde gratitude envers mon co-directeur de thèse, **Docteur Guendouz Ali** de l'INRAA, Sétif. Les mots me manquent pour exprimer à quel point je suis reconnaissante pour tout ce que j'ai appris grâce à lui. Sa vitalité, son dynamisme, sa compréhension et son encouragement ont été essentiels tout au long de ce projet. Il m'a guidée avec sagesse, générosité et patience, me poussant toujours à donner le meilleur de moi-même.

Mes vifs remerciements vont au **Professeur Benmahammed Amar** de l'université Sétif-1, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi qu'aux **Professeurs Mekhlouf Abdelhamid** de l'université de Sétif-1, **Bahlouli Fayçal** de l'université de Bordj Bou Arreridj, et **Benderradji Laid** de l'université de Msila, pour avoir pris sur leurs temps pour lire, examiner et juger ce modeste travail.

Mes vifs remerciements vont également à l'équipe de l'INRAA Sétif, et tout particulièrement au **Dr. Hannachi Abderrahmane** pour sa gentillesse et son soutien précieux et indéfectible, ainsi qu'à **Mlle Ghali Khaoula**, **M. Boulekbass Sara** et **Dr. Gaamoune Sofiane**.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au personnel de l'ITGC de Sétif, et tout particulièrement à Messieurs **Mehani Omar**, **Selloum Samir**, et **Dr. Bendada Hocine** pour leurs aides précieuses et les facilités mises à ma disposition pour le travail sur le terrain.

Mes remerciements vont aussi au personnel du laboratoire de valorisation des ressources biologiques et naturelles de l'Université de Sétif 1.

Je souhaite également remercier chaleureusement ma chère collègue **Lebachiche Ibtissem** pour sa présence constante, son aide précieuse et ses conseils éclairés tout au long de ce

travail, ainsi que bien avant. Un grand merci à ma chère collègue **Dr Loucif Hanine** pour son précieux soutien. Ton aide et ta bienveillance ont été d'une valeur inestimable.

Je remercie également ma collègue **Lamara Asma** pour son soutien précieux et inconditionnel.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères au **Dr. Frih Benalia** pour ses aides précieuses qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à **mon père**. Son soutien sans faille et sa foi inébranlable en mes capacités m'ont donné la force de surmonter tous les obstacles.

À **ma mère**, dont l'amour, la patience et les encouragements constants ont été les fondements de mon parcours.

À mes deux **chers frères**, merci pour votre amour, votre soutien et pour toujours être là à mes côtés. Je vous aime profondément.

À ma **chère sœur**, ma petite Doua, avec tout mon amour.

À toute ma famille et mes amis.

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie occupe la première place en Afrique, avec une superficie de plus de deux millions de kilomètres carrés. La majorité des activités agricoles en Algérie se concentre dans le nord du pays en raison des vastes zones désertiques non arables qui s'étendent vers le sud. Les principales cultures sont annuelles et incluent les céréales, les fourrages, les légumineuses alimentaires ainsi que les pommes de terre (Benbelkacem, 2014). Notamment, les céréales constituent un élément crucial du secteur agricole algérien, jouant un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire et l'économie du pays. En 2023/2024, la production nationale de céréales est estimée à 3,5 millions de tonnes, soit un niveau similaire à celui de la saison agricole 2022/2023. En effet, la production de céréales demeure inférieure d'environ 22 % à la moyenne quinquennale (Faostat, 2024).

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est probablement l'une des plus anciennes plantes cultivées dans le monde. En Algérie, le blé dur constitue la culture céréalière la plus importante avant l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) (Hannachi et Fellahi, 2023). Cependant, la plupart des cultures sont situées dans des zones de plateaux, où les précipitations et les températures varient considérablement d'une année à l'autre. Les gelées sont fréquentes au printemps et les vents chauds soufflent durant la phase de remplissage des grains, affectant gravement le rendement et ses composantes (Kourat, 2021). Pour cela, la production nationale demeure faible et n'arrive pas à satisfaire les besoins du pays, estimés à 8,5 millions de tonnes (Benbelkacem, 2022). Les stress abiotiques, notamment la sécheresse et les températures élevées, font partie des facteurs limitant la croissance et la productivité du blé. Ces stress peuvent entraîner une réduction du nombre d'épis et du poids des grains, induisant des pertes importantes de rendement et de qualité des céréales (Mesterházy et al., 2020). Ils peuvent également affecter les plantes aux niveaux morphologique, physiologique, biochimique et moléculaire. En fait, la sécheresse restreint la photosynthèse, modifie la teneur en chlorophylle, provoque des dommages à l'appareil photosynthétique des plantes et entraîne une réduction du potentiel hydrique des feuilles et de la teneur relative en eau. De plus, les plantes stressées présentent des températures de canopée plus élevées au stade de croissance végétative et à l'anthèse (Keyvan, 2010 ; Bali et Sidhu, 2019).

En outre, au-delà de la sécheresse, le stress oxydatif constitue un autre défi majeur pour la croissance des plantes. Ainsi, un stress oxydatif se produit lorsque les plantes cultivées sont exposées à des conditions abiotiques extrêmes ou à divers herbicides, ce qui conduit à une production et une accumulation excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) (Qamer et

al., 2021). Cependant, lorsque le niveau des espèces réactives d'oxygène augmente, une peroxydation lipidique accrue se produit dans les membranes cellulaires, ce qui, à son tour, affecte le fonctionnement cellulaire normal. Le taux de peroxydation lipidique est couramment utilisé comme indicateur des dommages causés aux membranes cellulaires par les ERO dans des conditions de stress (Caverzan et al., 2019). De plus, des modifications spécifiques des acides aminés, une fragmentation de la chaîne peptidique et une sensibilité accrue des protéines peuvent se produire (Mansoor et al., 2022).

Pour faire face à ces contraintes et survivre, les plantes ont mis en place diverses stratégies pour s'adapter en modifiant leurs systèmes métaboliques. L'ajustement osmotique constitue un mécanisme important pour diminuer le potentiel osmotique et maintenir l'état hydrique des feuilles ainsi que les fonctions cellulaires dans des sols à faible teneur en eau (Abeed et al., 2021). Dans des conditions de stress abiotique, les plantes allongent leurs racines dans le sol, s'enfoncent plus profondément et absorbent suffisamment d'eau et de minéraux pour survivre (Tumová et al., 2018). L'enroulement des feuilles est souvent observé chez de nombreuses espèces en réponse à divers stress abiotiques. Il est considéré comme un moyen d'évitement du stress chez les plantes (Kadioglu et al., 2012). De plus, l'accumulation de certains osmolytes tels que la proline et les sucres solubles a été considérée comme un critère de tolérance aux divers stress abiotiques. La proline s'accumule dans le cytosol, jouant un rôle crucial dans l'adaptation physiologique au stress (Chaib et al., 2015). Ainsi, dans les plants de blé, l'accumulation de proline en réponse au déficit hydrique agit comme une protection osmotique, favorisant des niveaux élevés de chlorophylle et de glycine bêtaïne (Jurkonienė et al., 2023). Également, les sucres solubles régulent la germination des graines, la floraison, la photosynthèse et la sénescence dans des conditions de stress abiotique (Singh et al., 2020). En outre, les plantes ont développé un système antioxydant composé d'antioxydants enzymatiques et non enzymatiques dans leurs tissus, qui jouent un rôle majeur dans l'élimination des ERO générées dans différentes conditions stressantes.

La sélection des génotypes stables, avec un rendement en grains élevé et adaptés aux différentes conditions abiotiques, est l'un des objectifs majeurs de la plupart des programmes de sélection. Ainsi, les génotypes qui diffèrent par leurs mécanismes d'adaptation aux stress constituent une ressource importante pour étudier la variation des mécanismes d'adaptation chez les plantes cultivées. Cette variation doit être exploitée pour améliorer simultanément la résistance aux stress et les rendements des variétés, ainsi que pour faciliter la sélection de ces caractères (Basu et al., 2019).

Dans le cadre de la présente étude, nous poursuivons trois objectifs principaux. Tout d'abord, nous évaluons l'efficacité des critères agronomiques, physiologiques et biochimiques pour la sélection de génotypes adaptés aux conditions semi-arides. Ensuite, nous examinons l'impact du stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate sur les génotypes de blé dur afin de mieux comprendre leurs mécanismes de tolérance. Enfin, nous testons l'efficacité des critères paramétriques et non paramétriques pour la sélection de génotypes stables, ce qui permettra d'identifier les variétés les plus résilientes face aux contraintes environnementales.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres. **Le premier chapitre**, une synthèse bibliographique, abordera les aspects généraux de la culture du blé dur, les défis de production, les mécanismes de sélection et d'adaptation aux stress abiotiques, ainsi que les approches paramétriques et non paramétriques permettant d'évaluer la stabilité et l'adaptabilité du rendement.

Dans **le deuxième chapitre**, nous analysons le comportement agro-physiologique des génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans des conditions semi-arides.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation du comportement des génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous l'effet d'un stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate. La première partie porte sur l'évaluation de la peroxydation lipidique, de la teneur en proline et des sucres solubles, en tant qu'indicateurs de la tolérance au stress oxydatif chez les génotypes évalués. La seconde partie se concentre sur l'évaluation de la teneur en chlorophylle et de la stabilité des membranes sous stress oxydatif, à travers une étude in vitro.

Le **quatrième chapitre** est consacré à l'évaluation de la stabilité du rendement en grains et du poids de mille grains chez les génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.).

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1- L'origine génétique et géographique de blé dur

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.), appartient à la classe des angiospermes, sous-classe des monocotylédones, famille des tritacées. Le blé dur est une espèce allotétraploïde ($2n = 4x = 28$, génome AABB) issue d'une hybridation spontanée entre le blé diploïde sauvage *Triticum urartu* ($2n = 2x = 14$, génome AA) et une espèce apparentée à *Aegilops speltoides* ($2n = 2x = 14$, génome BB) (Marcussen et al., 2014). L'hybridation naturelle a conduit à l'apparition du blé dur sauvage *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*, qui a ensuite évolué progressivement vers *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum*, puis vers *Triticum durum* (blé cultivé) (Figure 1).

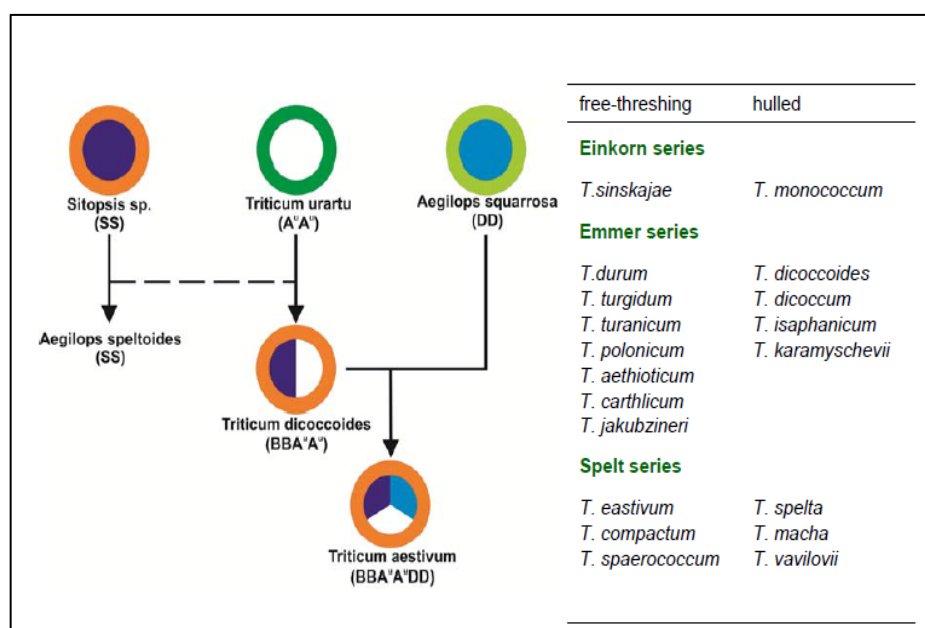


Figure 1. Phylogénie des espèces de blé (Schuhwerk et al., 2011)

L'origine géographique du blé se situe dans les régions occidentales de l'Iran, de l'est de l'Irak, ainsi que dans le sud et l'est de la Turquie. Le blé a été l'une des premières espèces végétales cultivées et récoltées par l'homme il y a environ 7 000 à 10 000 ans en Palestine, en Syrie, en Irak et dans une grande partie de l'Iran (Williams et Croston, 1981). De nombreux restes de blé, diploïdes et triploïdes, ont été retrouvés conservés dans des vestiges archéologiques remontant à 7 000 ans avant notre ère dans les régions du Proche-Orient (Harlan, 1975).

2- Les superficies et la production de blé

2-1 La production mondiale

À l'échelle mondiale, la culture du blé dur est moins importante que celle du blé tendre (représentant environ 10 % de la production totale), mais elle est plus lucrative. L'industrie des pâtes a accru la demande pour le blé dur, dont le prix est de 10 % à 20 % supérieur à celui

du blé tendre (Sall et *al.*, 2019). Le blé dur est principalement cultivé dans trois grandes régions : la Méditerranée, les plaines du Nord entre les États-Unis et le Canada, ainsi que dans les zones désertiques du sud-ouest des États-Unis et du nord du Mexique. Les principaux producteurs sont la Turquie et le Canada, suivis par l'Algérie, l'Italie et l'Inde.

Dans le bassin méditerranéen, la production totale varie considérablement en raison de sa dépendance aux précipitations. En Afrique du Nord et en Europe du Sud, le rendement est fortement influencé par la sécheresse (Ranieri, 2015). Les besoins en blé dur des pays du bassin méditerranéen dépassent leur production locale, ce qui conduit chaque année à l'importation de plus de 5 millions de tonnes, principalement en provenance des États-Unis et du Canada.

Les données du Conseil international des céréales (CIC) indiquent que la production mondiale de blé dur a diminué de 10 % pour s'établir à 31,4 millions de tonnes métriques (MMT) en 2023/2024. La consommation a dépassé la production de 2,6 MMT, ce qui a entraîné un bilan serré du blé dur (Figure 2). Canada est le premier exportateur mondial, la production de blé dur a diminué de 30 % pour atteindre 4,0 millions de tonnes métriques (MMT) en raison de la sécheresse dans les principales zones de culture.

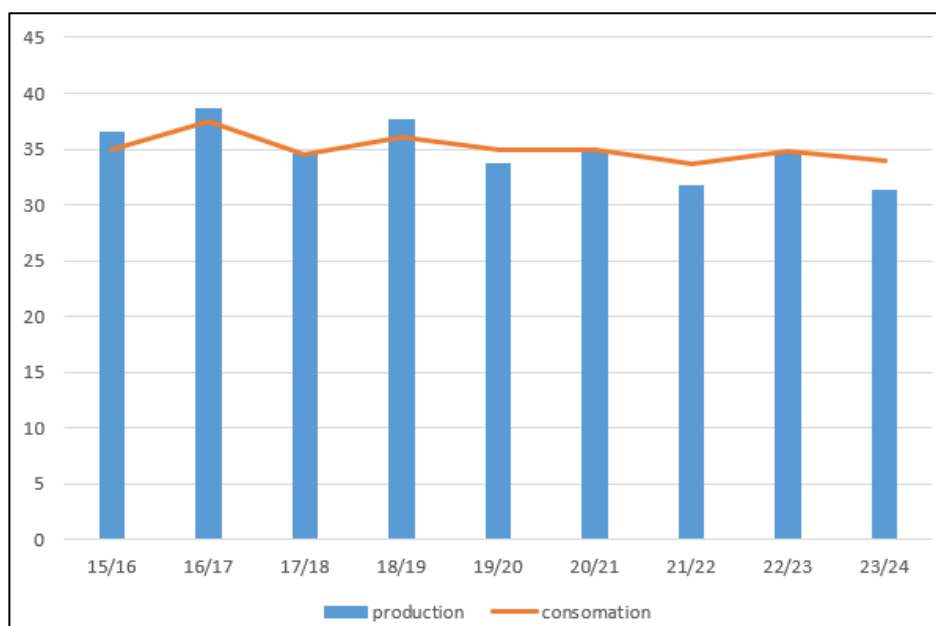


Figure 2. La production et la consommation mondiales de blé dur (2015-2024).

2-2 La production en Algérie

Selon Direction des Systèmes d'Information, des Statistiques et de la Prospective (2019), la superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara. La superficie agricole représente 18,5 % de la superficie totale, bien que, la superficie agricole utile (SAU) est estimée de 8,56 millions d'hectares, dont les cultures

herbacées couvrent 4,8 millions d'hectares. La céréaliculture constitue la principale activité en zones arides et semi-arides. La production blé en Algérie en 2023/2024 est estimée à 2,7 Millions de tonnes, soit un décroissement par rapport à l'année 2022-2023 où la production est estimée en moyenne à 3,7 Millions de tonnes (USDA, 2024). En Algérie, la production céréalière est étroitement liée aux conditions climatiques, ce qui entraîne des variations significatives d'une année à l'autre en termes de surface agricole utile (SAU), de production et de rendement. Selon Djermoun (2009) La forte variation de la production céréalière est étroitement liée au manque de précipitations ainsi qu'à leur mauvaise répartition au cours de l'année. Pour pallier le manque de produits céréaliers, l'Algérie se retourne vers l'importation principalement en provenance de la France, des Etats Unis, du Canada et de l'Argentine qui sont les principaux fournisseurs (Rastoin et Benabderrazik, 2014).

En effet, l'Algérie consomme en moyenne 11 millions de tonnes de blé par an, ce qui en fait le deuxième consommateur en Afrique du Nord après l'Égypte. Cependant, le pays n'arrive pas à répondre aux besoins des consommateurs a donc au recours à l'importation. Selon le rapport du département américain de l'agriculture (USDA, 2024), l'Algérie importe environ 8,7 millions tonnes de blé en 2023/2024 soit une hausse de 7,4 % par rapport à la campagne 2022/2023.

4- Les contraintes abiotiques du milieu de production et son effet sur la plante

4-1 Le stress hydrique

Les performances de rendement de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les hauts plateaux algériens sont limitées par l'action des stress abiotiques, principalement la sécheresse (Benmahammed et *al.*, 2010 ; Bouchemal, 2018). Il est même rare de trouver un environnement sans stress où le potentiel de production est abouti. Le stress hydrique est le facteur qui induit le plus d'effet négatif sur les productions agricoles. En effet, la sécheresse est une contrainte majeure de la production céréalière dans beaucoup de régions ; sa fréquence et son intensité ont augmenté dans la plupart des régions arides et semi-arides selon les prévisions faites sous différents scénarios de changements climatiques futurs (Ladoui et *al.*, 2020). Le déficit hydrique est lié à la faiblesse des précipitations sur une période prolongée, par rapport à la moyenne des apports habituellement observés sur cette période. Il s'installe à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles (Kara, 2015).

Le stress hydrique s'explique par une série de modifications qui touchent la croissance, les caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques (Chahbar et belkhodja, 2016). Il

s'exprime en premier lieu au niveau des feuilles et s'étend par la suite vers la tige et les racines (Hacini, 2014). Selon Benmahammed et *al.* (2008) un déficit hydrique influence significativement les composantes du rendement, il affecte aussi indirectement la plante par la réduction de la nutrition minérale, l'augmentation de la salinité du sol et la résistance mécanique du sol au développement des racines (Sebbane, 2021).

Chez les plantes souffrant d'un déficit hydrique, le rapport entre le poids des racines et le poids des tiges augmente en raison de la croissance des racines au détriment de la partie aérienne. Outre, le déficit hydrique affecte l'intégrité de la membrane plasmique, le contenu en chlorophylle, et l'activité photosynthétique (Oulmi et *al.*, 2014). De plus, Gate et *al.* (2011) mentionnent qu'en présence de déficit hydrique, la croissance des plantes ralentit, les stomates se ferment plus ou moins rapidement, ce qui limite l'assimilation du carbone et donc la croissance.

Le tallage est un facteur clé influençant le rendement en grains des céréales. Une carence hydrique précoce pendant la phase végétative diminue à la fois le nombre et la taille des talles chez le blé. Après la fécondation, un stress hydrique réduit la taille des organes. S'il persiste durant la phase de remplissage, il altère leur composition et entraîne une diminution du poids de 1000 graines en affectant la vitesse et la durée du remplissage des grains (Bouthiba et *al.*, 2010).

L'effet du stress dépend de sa prolongation et de sa sévérité. Si le déficit hydrique persiste et la teneur en eau dans le sol atteint le point de flétrissement permanent, il devient létal pour la plante (Mosa et *al.*, 2017). Selon Adjabi (2011), la plante est dotée des mécanismes de tolérance au stress hydrique qui prennent place à différents niveaux de l'architecture de la plante, de la cellule à la plante entière, et sont les mêmes pour toutes les espèces végétales à des degrés variables. De plus, la réaction des plantes face à la sécheresse varie en fonction du génotype, de la durée et de la gravité du stress et du stade de développement (Nezhadahmadi et *al.*, 2013). Ces processus d'adaptation entraînent divers changements phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques qui interagissent pour maintenir la croissance, le développement et la production de la plante. Akıncı et Losel (2012) mentionnent que les plantes adoptent de variables stratégies écologiques et physiologiques pour éviter et/ou tolérer le déficit hydrique. Selon la sévérité et la persistance du stress, les plantes peuvent réagir par des changements éphémères principalement physiologiques comme la fermeture des stomates, l'acclimatation à la faible disponibilité d'eau par l'ajustement osmotique et des modifications morphologiques et l'adaptation au déficit hydrique par des

mécanismes physiologiques perfectionnés et surtout des modifications anatomiques. Les génotypes considérés tolérants à la sécheresse endurent le stress et récupèrent mieux après la réhydratation par rapport aux génotypes sensibles tous dépend de la sévérité du stress.

4-2 Le stress thermique

Le stress thermique est souvent défini comme une augmentation de la température au-delà d'un seuil pendant une période suffisante pour causer des dommages irréversibles à la croissance et au développement des plantes (Wahid et *al.*, 2007 ; Hu et *al.*, 2020).

Le blé est particulièrement susceptible au stress thermique élevé, notamment pendant la phase d'anthèse, et a moins susceptible de se rétablir s'il est stressé à ce stade critique (Yadav et *al.*, 2022). Une température élevée modifie différents processus physiologiques, biologiques et biochimiques dans le blé (Eyshi et *al.*, 2014). En outre, un stress thermique chez le blé peut entraîner une mauvaise germination des graines, une diminution de la durée de remplissage des grains, une réduction du nombre de grains, une diminution de la capacité photosynthétique et une réduction du taux de translocation des assimilés (Poudel, 2020). Également, les températures élevées endommagent l'activité des protéines et la fluidité des lipides membranaires, affectant ainsi l'activité des enzymes des chloroplastes et des mitochondries ainsi que l'intégrité de la membrane. Un stress thermique sévère et une exposition à long terme à des températures modérément élevées peuvent entraîner des dommages cellulaires et la mort des cellules (Wahid et *al.*, 2007 ; Hu et *al.*, 2020).

4-3 Le stress oxydatif

Pratiquement tous les stress environnementaux et biotiques déclenchent une réponse étendue au stress appelée stress oxydatif qui peut endommager les composants cellulaires et provoquer leur dysfonctionnement. Ceci est induit par la surproduction et l'accumulation de molécules contenant de l'oxygène activé et appelées « espèces réactives de l'oxygène (ERO ou ROS) » (Vadim, 2015). Donc, le stress oxydatif est défini comme un déséquilibre entre la production d'espèces réactives d'oxygène (ROS) et la capacité antioxydante de la cellule (Figure 3) (Migdal et Serres, 2011). En outre, des différents herbicides tels que le glyphosate peut produire un stress oxydatif en produisant les molécules réactives d'oxygène à des hautes niveaux qui peuvent endommager diverses structures cellulaires (Kronberg et *al.*, 2021). De nombreux chercheurs ont découvert que l'herbicide glyphosate induisait un stress oxydatif dans le riz (Karabulu et *al.*, 2021), le blé (Malagoda et *al.*, 2020), et la tomate (Khan et *al.*, 2020). De plus, un autre herbicide appelé Paraquat (1,1'-diméthyl-4,4'-bipyridinium

dichloride), peut augmenter la formation des radicaux libres et le stress oxydatif ainsi que peut altérer le chloroplaste en déclenchant le transfert d'électrons du photosystème I vers l'oxygène ce qui entraîne la formation d'anion superoxyde ($O_2^{\bullet-}$) et d'autres formes de ROS (Bouchemal et *al.*, 2016).

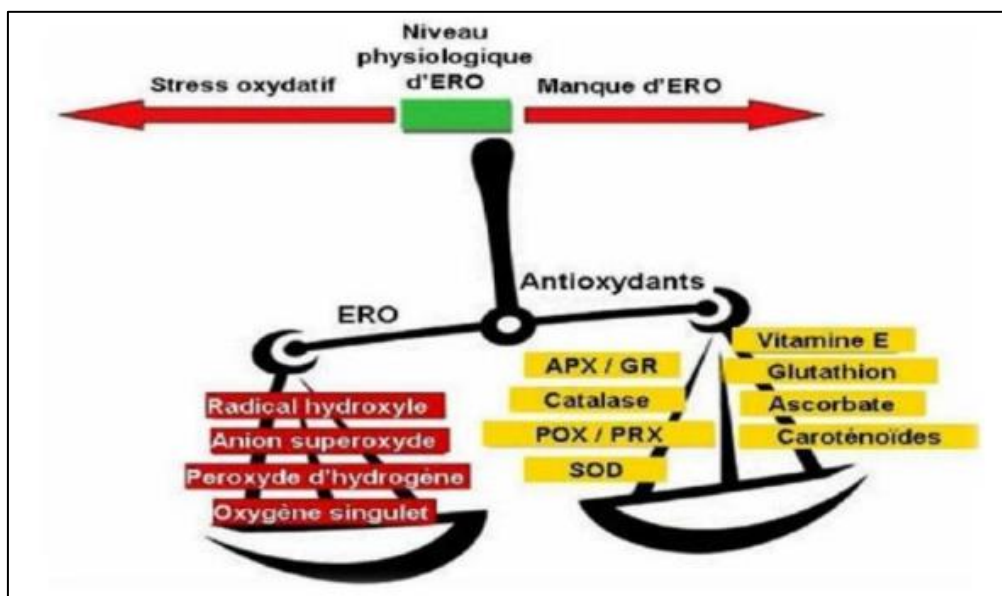


Figure 3. Représentation de la balance entre les espèces réactive d'oxygène (ERO ou ROS) et le système antioxydant (Pourrut, 2008).

Comprendre le stress oxydatif dans les plantes est crucial pour développer des stratégies visant à réduire ses effets et à améliorer la productivité des cultures. Les progrès récents en biologie moléculaire et en biotechnologie végétale ont visé le développement de nouvelles approches visant à améliorer les systèmes de défense antioxydants des plantes (Hasanuzzaman et Fujita, 2022).

4-3-1 Les espèces réactives d'oxygènes (ERO ou ROS)

Une conséquence inévitable du métabolisme aérobie est la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ce sont des molécules capables d'existence indépendante, contenant au moins un atome d'oxygène et un ou plusieurs électrons non appariés (Jakubczyk et *al.*, 2020). Les principaux membres de la famille ROS comprennent les radicaux libres comme $O^{\bullet-}$, $OH^{\bullet}$ et les non-radicaux comme H_2O_2 et $1O_2$. Ainsi, la production des espèces réactives de l'oxygène dans les plantes est principalement localisée dans les chloroplastes, les mitochondries et les peroxysomes. Il existe également des sites secondaires comme le réticulum endoplasmique, la membrane cellulaire, la paroi cellulaire et l'apoplaste (Das et Roychoudhury, 2014).

Dans des conditions favorables, les ROS sont régulièrement générées aux faibles quantités et sont incapables de causer des dommages ; néanmoins ces faibles niveaux sont nécessaires à la progression de plusieurs processus biologiques fondamentaux, notamment la prolifération et la différenciation cellulaire (Huang et *al.*, 2019). Les travaux de Finkel (2011) suggèrent que les espèces réactive d'oxygènes fonctionnent comme des régulateurs physiologiques des voies de signalisation intracellulaires. De plus, les espèces réactives d'oxygène agissent comme une alarme pour que les voies métaboliques de la plante soient détournées vers la protection de la plante et la limitation des dommages. La signalisation sous stress entraîne une production excessive de ROS, qui endommage les cellules végétales en provoquant un déséquilibre du rédox, une peroxydation des lipides, une dégradation de la chlorophylle, des acides nucléiques et des protéines (Sahu et *al.*, 2022).

4-3-2 L'impact des espèces réactives de l'oxygène et les dommages oxydatifs

La surproduction de ROS entraîne une explosion oxydative et des dommages aux biomolécules (Figure 4), ces dommages affectent la croissance, le développement et finalement la survie des plantes (Sachdev et *al.*, 2021). L'étendue des dommages causés aux biomolécules dépend de divers facteurs, notamment la concentration, l'emplacement, la vitesse de réaction, les incidents nocifs secondaires et le système de réparation, de récupération ou de détoxification des ROS.

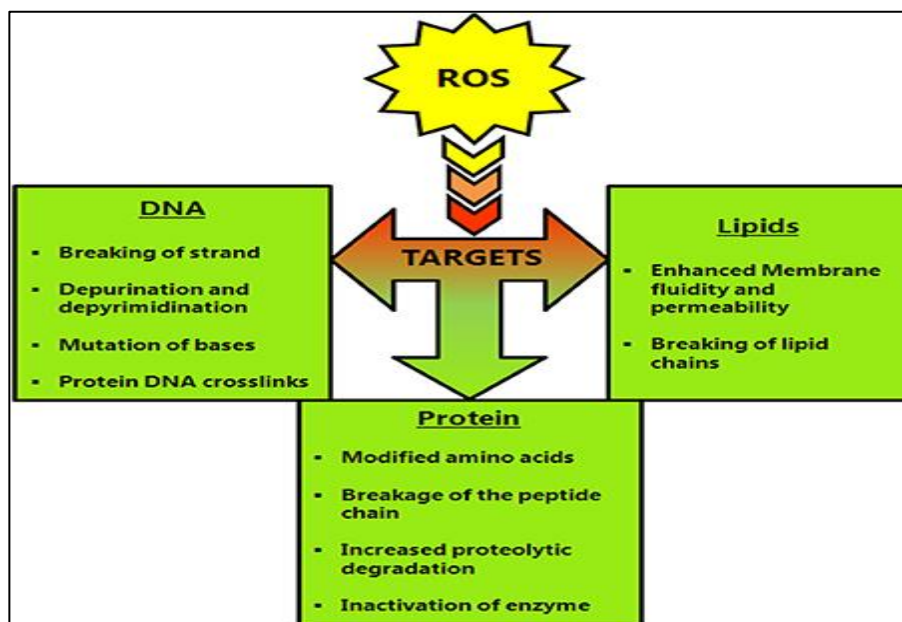


Figure 4. Les différentes cibles des espèces réactives d'oxygènes (ERO ou ROS) (Das et Roychoudhury, 2014)

La peroxydation des lipides est la procédure par laquelle des oxydants tels que les radicaux libres ou les espèces non radicales attaquent les lipides contenant des liens doubles carbone-carbone (Cordiano et *al.*, 2023). La peroxydation est considérée comme un symptôme le plus évident du stress oxydatif chez les plantes (Labudda, 2013). Par conséquent, les niveaux de peroxydation lipidique dans des conditions de stress sont de bons indicateurs des dommages causés aux membranes cellulaires induits par les ERO (Choudhary et *al.*, 2020). Le malondialdéhyde (MDA) est l'un des produits finaux de la peroxydation des acides gras polyinsaturés dans les cellules, une augmentation des radicaux libres provoque une surproduction de malondialdéhyde. Ce processus de la peroxydation se déroulera en trois étapes principales : initiation, la propagation, et la terminaison. Lors de l'initiation un atome d'hydrogène d'un radical hydroxyle ($\bullet$ OH) extraire l'hydrogène allélique d'un acide gras polyinsaturé (LH) conduisant à la formation du radical lipidique ($L\bullet$). Pendant la propagation le radical lipidique ($L\bullet$) est réagi rapidement avec l'oxygène pour donner la naissance à un radical lipoperhydroxyle ($LOO\bullet$). Ce dernier est réagi avec un autre LH formant un hydro peroxyde lipidique ($LOOH$) et un nouveau radical lipidique ($L\bullet$) pour assurer la continuation du processus. Quand deux types lipidiques radicalaires réagissent ensemble pour former deux composés stables, le cycle est terminé avec succès (Ayala et *al.*, 2014). Une fois le processus de peroxydation initiée, une propagation de réactions en chaîne aura lieu jusqu'à ce que des produits de terminaison soient produits.

De plus, sous un stress oxydant, la superproduction des espèces réactives d'oxygènes (ROS ou ERO) affecte les protéines et engendrent des différentes modifications qui peuvent être soit directes soit indirectes. Les changements directs impliquent la modulation de l'activité d'une protéine par la carboxylation, la formation de liaisons disulfure, la glutathionylation et la nitrosylation. Cependant, lors des modifications indirectes, les ERO endommagent les protéines via les produits de peroxydation des acides gras, qui se lient aux protéines pour modifier leur activité (Sharma et *al.*, 2012 ; Choudhary et *al.*, 2020). De plus, Sharifi-Rad et *al.* (2020) mentionné que les dommages aux protéines impliquent une modification des acides aminés spécifiques à un site, une agrégation de produits de réaction réticulés, une fragmentation de la chaîne peptidique, une inactivation enzymatique et une susceptibilité à la protéolyse, et une altération de la charge électrique. Les groupes sulfhydryle et les acides aminés aromatiques des protéines sont vulnérables aux dommages oxydatifs (Mccgill et *al.*, 2013). Ainsi, la cystéine et la méthionine sont tous deux susceptibles d'être endommagés par les radicaux $1O_2$ et $\bullet$ OH (Bin et *al.*, 2017). Les protéines oxydées ainsi devenir de meilleures

cibles pour la digestion protéolytique en vous préparant pour la dégradation protéasomale médiée par l'ubiquitination (Das and Roychoudhury, 2014).

Au niveau des noyaux L'ADN est une cible potentielle pour les dommages causés par les ERO, qui peuvent potentiellement provoquer une dégradation de l'ADN chez les plantes où les ERO brisent les fils d'ADN, éliminent et/ou altèrent les nucléotides et oxydent la désoxyribose (Das et Roychoudhury, 2014). Ainsi, Choudhary et *al.* (2020) Déclarent que les ERO réagissent avec les bases azotées et le désoxyribose, en provoquant des réactions oxydatives, des mutations, une carcinogénèse, une apoptose, une nécrose et des maladies héréditaires. Les cassures de l'ADN simple brin résultent de l'abstraction d'un atome d'hydrogène de la position C-4' par un radical libre (Taverna Polo et *al.*, 2015). La molécule OH• crée des liaisons croisées ADN-protéine lors de sa réaction avec l'ADN ou les protéines liées, qui ne sont pas facilement réparables et peuvent être mortelle aux cellules végétales si elles ne sont pas réparées avant les processus cellulaires critiques (Das et Roychoudhury, 2014).

5- Les critères de sélection du blé dur pour la tolérance aux stress abiotiques

5-1 Les critères phénologiques

La phénologie est un phénomène relatif à la périodicité du développement et croissance de la plante. En amélioration variétale, des stratégies appliquées pour minimiser les effets de stress abiotiques consistent à raccourcir la durée du cycle de développement de la plante. En effet, certaines variétés achèvent leur cycle de développement avant le développement de la contrainte hydrique pour éviter les périodes difficiles de croissance et de développement (Mzabri et al., 2017). Donc la précocité est un mécanisme important pour l'évitement de la sécheresse de la fin de cycle, Selon Rabti (2020) la tardiveté augmente les risques du déficit hydrique et des températures élevés de fin de cycle. En outre, Farooq et *al.* (2012) mentionnent que les quantités limitées d'eau peuvent déclencher chez les plantes le raccourcissement du cycle de croissance. C'est le cas des variétés de blé et de l'orge où la durée totale de croissance se diminue en conditions de sécheresse. D'autre part Mekhlouf et *al.* (2006) trouvent qu'une précocité excessive n'est d'aucune utilité dans le milieu ou le gel tardif, mais elle risque d'entraîner une instabilité de rendement en grains.

5-2 Les critères morphologiques

Les différents stress abiotiques sont associés à des modifications de l'anatomie et de l'ultrastructure des espèces végétales, les modifications morphologiques les plus importants

comprennent une diminution de la taille des feuilles, une réduction du nombre de stomates, un épaississement des parois cellulaires des feuilles, une cutinisation de la surface des feuilles, un tissu conducteur mal développé et une sénescence précoce.

Un système racinaire développé joue un rôle important dans l'alimentation hydrique et minérale de la plante (El Fakhri et *al.*, 2011). Lorsqu'une plante est soumise à des conditions de stress hydrique, leurs racines s'allongent dans le sol, s'enfoncent plus profondément et absorbent suffisamment d'eau et de minéraux pour survivre (Tumová et *al.*, 2018). La surface foliaire détermine progressivement les quantités d'eau utilisées par la plante sous forme de transpiration et les quantités de carbone fixées par voie photosynthétique (Benmahammed et *al.*, 2008). La réduction de la surface foliaire dans les conditions de stress abiotique est un mécanisme important pour réduire les besoins en eau. Ainsi, L'enroulement des feuilles est connu comme une réponse typique aux différents stress abiotiques chez de nombreuses espèces telles que le riz, le maïs, le blé et le sorgho, il est accepté comme un mécanisme d'évitement du stress chez les plantes (Kadioglu et *al.*, 2012). De plus, La sénescence des feuilles pourrait être accélérée sous conditions de stress abiotiques, entraînant une réduction de l'efficacité, du rendement et de la qualité de la photosynthèse (Tan et *al.*, 2023).

5-3 Les critères physiologiques

L'étude de la tolérance physiologique aux stress vise à renforcer les capacités génétiques de production des plantes sous des conditions moins favorables, cette démarche repose sur le fait que certaines variétés sont plus résistantes aux stress que d'autres (Benderradji, 2013). La sélection des génotypes qui varient en fonction de leur capacité photosynthétique dépend de la quantité de tissu photosynthétique par unité de surface foliaire. Une période de stress peut réduire la photosynthèse en diminuant la surface foliaire et le taux de la photosynthèse par unité de surface foliaire (Yang et *al.*, 2021). En effet, cette réduction est due principalement à la fermeture des stomates ou à un dysfonctionnement métabolique. De ce fait, les plantes développent des stratégies différentes pour limiter les dommages causés à la photosynthèse, comprenant la dissipation thermique de l'énergie lumineuse, le cycle eau-eau, le cycle de xanthophylle et la séparation des complexes absorbant la lumière des centres de réaction photosynthétiques (Basu et *al.*, 2016). De plus, la réduction de la taille et du nombre des stomates lors de l'exposition à la sécheresse est une méthode adoptée pour la survie des plantes dans ces conditions.

La teneur relative en eau de la feuille est un paramètre physiologique permet de mesurer l'état hydrique de la plante reflétant l'activité métabolique dans les tissus, et utilisé comme un

indice très significatif pour la tolérance à la sécheresse (Sallam et *al.*, 2019). De plus, la teneur relative en eau est principalement liée à l'absorption de l'eau par les racines ainsi qu'à la perte d'eau par la transpiration (Anjum et *al.*, 2011). Il est également connu que l'exposition au stress dû à la sécheresse diminue considérablement la teneur relative en eau, la pression de turgescence, le potentiel hydrique des feuilles et le taux de transpiration chez de nombreux espèces végétales (Hussain et *al.*, 2018). Sous l'effet de la sécheresse, les feuilles des plantes montrent une réduction de leur teneur en eau et de leur potentiel hydrique. En outre, le changement de la température foliaire peut être un facteur important dans le contrôle de l'état hydrique des feuilles en cas de stress hydrique (Farooq et *al.*, 2009). Les plantes tolérantes sont celles qui sont capables de perdre moins d'eau par unité de temps et unité de surface durant la période de stress. Ainsi, l'étude de Slama et *al.* (2005) montrent que l'élaboration d'un rendement en grain élevé dans des conditions de sécheresse est liée aux mécanismes de tolérance qui minimisent les pertes en eau et assurent une bonne hydratation cellulaire en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire.

La fermeture des stomates est une réponse essentielle et rapide à la survie des plantes confrontées à un stress dû à la sécheresse et, fait intéressant, ce processus repose sur la production de ROS activée par l'acide abscissique (ABA) par des NADPH oxydases localisées dans la membrane. L'intégration des NADPH oxydases et des ROS en tant que messagers importants dans la signalisation ABA régit les réponses moléculaires des plantes à la sécheresse et nécessite l'équilibre dédié susmentionné entre la production et la récupération des ROS

Selon Muhammed Aslam et *al.* (2022) l'acide abscissique (ABA) est une hormone synthétisée dans les racines, est transférée aux feuilles, permet de faciliter l'adaptation des plantes aux différents stress et joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes. Dans les conditions défavorables, l'ABA est synthétisé dans les racines puis transporté par les vaisseaux du xylème jusqu'à la pousse où elle inhibe l'expansion des feuilles et induit la fermeture des stomates, ce qui constitue une adaptation importante à l'approvisionnement limité en eau du sol (Wach et Skowron, 2022)

5-4 Les critères biochimiques

5- 4-1 La teneur en proline

La proline est un acide aminé protéinogène avec une amine secondaire dans le groupe α -amino et une structure cyclique inhabituelle qui confère une rigidité conformationnelle à la

structure secondaire des protéines (Spormann et *al.*, 2023). Elle joue un rôle très important chez les plantes exposées à des différentes conditions de stress abiotique (Shamsul et *al.*, 2012). Le phénomène d'accumulation de la proline se produit en cas d'un déficit hydrique, la salinité, les baisses températures, et les métaux lourds, cette accumulation constitue un mécanisme physiologique adaptatif important pour limiter les effets du différents stress environnemental sur les plantes (Hossain et *al.*, 2014). Son accumulation dans les feuilles de plantes qui souffrent d'un manque d'eau a été décrite très anciennement (Cornic, 2008). Selon l'étude de Shamsul et *al.* (2012) l'accumulation de la proline se produit dans le cytoplasme où fonctionne comme un chaperons moléculaire stabilisant la structure des protéines et maintient le statut rédox cellulaire. Ainsi, elle agit à stabilisation des membranes et de structures subcellulaires, et protéger les fonctions cellulaires en éliminant les espèces réactives oxygénées (ERO) (Kaur and Asthir, 2015). De plus, Hosseinifard et *al.* (2022) suggérons que cette biomolécule améliore la résistance des plantes au stress abiotique en augmentant la photosynthèse, l'activité antioxydante enzymatique et non enzymatique, en régulant la concentration d'osmolyte et l'homéostasie du sodium et du potassium. Dans cette revue, nous discutons de la biosynthèse, de la détection, de la signalisation et du transport de la proline ainsi que de son rôle dans le développement de divers tissus végétaux, notamment les graines, les composants floraux et les tissus végétatifs. Plusieurs travaux mentionnent que l'utilisation de la proline peut augmenter la tolérance des plantes au différents stress (Buut et *al.*, 2016 ; Orsini et *al.*, 2018 ; Priya et *al.*, 2019).

5-4-2 Les sucres solubles

Les sucres solubles, fréquemment définis comme mono- et les disaccharides, jouent un rôle important dans la structure et l'activité de toutes les cellules vivantes, leur origine semble être étroitement lié à l'évolution prébiotique et biotique précoce (Couée et *al.*, 2006). Chez les plantes, les sucres sont les substrats métaboliques impliqués dans la modulation active de plusieurs processus métaboliques à différents stades de croissance et de développement. De plus, les sucres solubles assurent un flux adéquat d'énergie et de matériaux de construction pour réaliser des activités spécifiques de développement des plantes (Afzal et *al.*, 2021). L'accumulation de sucres solubles améliore la survie des plantes sous des conditions de stress abiotiques tels que le sel, la chaleur, le froid et la sécheresse. De plus, Amist et Singh (2020) signalent que sous des conditions de stress abiotique plusieurs processus physiologique tels que la germination des graines, la floraison, la photosynthèse, et la senescence sont régulées par les sucres de la plante. Les sucres sont traités comme un outil pour lutter contre le stress

abiotique en détoxifiant les composés toxiques, maintenant l'ajustement osmotique et la stabilisation de la membrane (Ahmad et *al.*, 2020). Selon Chauhan et *al.* (2022) les sucres solubles sont des osmolytes importants, qui limitent les dommages cellulaires dus au stress oxydatif ; les niveaux de sucre peuvent également s'accumuler en raison de la dégradation de l'amidon dans des conditions de stress. En effet, les génotypes tolérants aux stress accumulent plus des sucres solubles que les génotypes sensibles.

5-4-3 Les enzymes antioxydants

L'équilibre entre la génération et l'élimination des espèces réactives d'oxygènes doit être étroitement contrôlé et/ou métabolisé efficacement pour éviter d'éventuels dommages causés à la machinerie cellulaire, ainsi qu'à la productivité globale (Thakur et Garg, 2022). Une batterie de molécules antioxydantes est présente dans les plantes pour contrôler les niveaux de ROS et maintenir l'homéostasie cellulaire en cas de stress (Pandey et *al.*, 2017). Le système de défense antioxydant est responsable de l'augmentation de la tolérance des plantes à diverses conditions de stress environnementales. De plus, les niveaux de réponse dépendent donc de divers facteurs tels que l'espèce impliquée, l'état métabolique de la plante ainsi que l'intensité et la durée du stress (Ahmad et *al.*, 2014). Les principaux antioxydants enzymatiques présents dans les plantes comprennent : la superoxyde dismutase (SOD), l'ascorbate peroxydase (APX), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPX), la monodéhydroascorbate réductase (MDHAR), la déhydroascorbate réductase (DHAR), la glutathion réductase (GR) et le glutathion S- transférase (GST). Plus que ça, il existe un autre groupe comprenant les antioxydants non enzymatiques sont : le glutathion, l'ascorbate, les tocophérols, les caroténoïdes et les flavonoïdes (Mishra et *al.*, 2023).

La première ligne de défense contre les ROS est la dismutation catalysée par la superoxyde dismutase (SOD) et est 10 000 fois plus rapide que les réactions spontanées (Younus, 2018). Il catalyse la dismutation de radicaux libres $O_2^{\bullet -}$ en réduisant un radical en H_2O_2 et en oxydant un autre en O_2 , éliminant ainsi le risque de production de radicaux libres $^{\bullet}OH$ plus toxiques (Sachdev et *al.*, 2021). De plus, la catalase est un enzyme important pour la détoxification des espèces réactives d'oxygènes dans des conditions de stress, elle est fréquemment étudiée en raison de leur rôle dynamique dans l'élimination des molécules H_2O_2 synthétisé dans les peroxysomes par l'intermédiaire d'oxydases impliquées dans le catabolisme des purines, la photorespiration et la β -oxydation des acides gras (Hussain et *al.*, 2019). Selon Gill et Tuteja (2010), une molécule de catalase peut convertir 6 millions de molécules d' H_2O_2 en H_2O et en O_2 par minute. D'autre part, L'ascorbate peroxydase (APX) joue un rôle essentiel dans

l'élimination des espèces réactives d'oxygènes intracellulaires et protège les plantes des dommages oxydatifs pouvant survenir à la suite de stress biotiques et abiotiques (Hong et *al.*, 2018). Bien que la catalase réduit les niveaux de H₂O₂ dans le peroxysome, L'ascorbate peroxydase (APX) occupe cette fonction dans le chloroplaste et le cytosol des cellules végétale (Nandini et Sharma, 2016).

5-5 La sélection pour l'amélioration du rendement en grain

Le rendement en gain est un caractère quantitatif très complexe, qui dépend d'un très grand nombre de gènes qui agissent de manière additive ou par interaction, ainsi que des changements d'environnement et de leurs interactions avec l'ensemble des gènes (Mwadsingeni et *al.*, 2016).

Mazouz et *al.*, (2017) mentionnent qu'un rendement élevé est le résultat de la capacité de la plante à utiliser efficacement l'eau de pluie pour produire du grain, d'une distribution équilibrée de la matière sèche accumulée entre les grains et la paille, c'est-à-dire un bon indice de récolte qui conduit à la production d'un nombre élevé de grains par mètre carré. Sous conditions contraignantes, lorsque le nombre de grain/m² est faible, les génotypes le compensent par une augmentation du poids moyen afin de minimiser la baisse du rendement en grain (Bahlouli et *al.*, 2009). Comprendre les relations entre le rendement et les différentes composantes permet d'identifier les critères de sélection les plus appropriés. Ces informations aident à orienter le processus de sélection pour favoriser les caractéristiques susceptibles d'améliorer le rendement (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000 ; Fellahi et *al.*, 2017).

On peut agir directement ou indirectement pour améliorer le rendement des grains. La sélection directe est basée sur la mesure directe du rendement, dans la plupart des cas après la récolte. En revanche, la sélection indirecte se concentre sur les composantes du rendement et les caractères morphologiques (Laala et *al.*, 2010). La sélection du rendement des grains n'est efficace que si les conditions environnementales ayant permis d'atteindre ce rendement se reproduisent de manière régulière (Kadi et *al.*, 2010).

5-6 La sélection pour la stabilité du rendement en grains

La stabilité est la capacité des plantes à maintenir leur rendement malgré les variations des conditions environnementales (Shrestha et *al.*, 2020). La stabilité du rendement en grains est un critère essentiel pour le développement de cultivars adaptés à des milieux à pluviométrie variable. La stabilité est déterminée par l'adaptation aux environnements, cette adaptation peut être dans l'espace, dite stabilité spatiale ou dans le temps, stabilité temporelle (Haddad,

2017). Des génotypes stables rassurent les agriculteurs et permettent aux multiplicateurs de produire des semences adaptées aux environnements variés (Sebbane, 2021). En effet, selon Benmahammed et *al.* (2010) les producteurs préfèrent les génotypes caractérisés par leurs hauts rendements ainsi que par leur régularité. Par ailleurs, d'après Fellahi et *al.* (2017), le but principal de tout programme de sélection est l'identification de variétés possédant un rendement à la fois élevé et stable.

L'environnement dans lequel s'effectue la sélection joue un rôle important. Tous les milieux n'ont pas la même aptitude à révéler les différences génotypiques. L'existence d'une interaction génotype x environnement complique les efforts de sélection. Afin de bien comprendre la stabilité et d'estimer l'interaction génotypes-environnement, plusieurs mesures de la stabilité ont été développées. Certaines sont basées sur l'analyse de la variance, d'autres sur l'analyse de la régression ou sur des indices non paramétriques. Enfin, différentes méthodes peuvent être associées simultanément (Olivoto, 2020).

5-6-1 Les approches statistiques pour l'évaluation de la stabilité du rendement et de l'adaptabilité

5-6-1-1 Les indices paramétriques

- **Composante de variance moyenne (θ_i)**

Plaisted et Peterson (1959) ont introduit la composante de variance des interactions génotypes-environnement pour évaluer les interactions entre toutes les paires possibles de génotypes. Ils ont utilisé la moyenne des estimations pour chaque combinaison avec un génotype commun comme une mesure de stabilité. Par conséquent, les génotypes affichant une valeur plus faible pour θ_i sont considérés comme plus stables.

- **Composante de variance GE ($\theta_{(i)}$)**

Cette statistique constitue une mesure ajustée du paramètre de stabilité. Dans cette approche, le génotype est exclu de l'ensemble des données, et la variance des interactions génotypes-environnement (GEI) de ce sous-ensemble est utilisée comme indice de stabilité du génotype. Selon cette statistique, les génotypes avec des valeurs plus élevées pour $\theta_{(i)}$ sont considérés comme plus stables.

- **L'écovalence de Wricke (W_i^2)**

Wricke (1962) a introduit le concept d'écovalence, défini comme la participation de chaque génotype à la somme des carrés des interactions génotypes-environnement (GE). L'écovalence (W_i) d'un génotype est calculée en mettant au carré son interaction avec chaque environnement et en additionnant ces valeurs à travers tous les milieux. Ainsi, les génotypes

avec des valeurs minimales d'écovalence montrent des écarts réduits par rapport à la moyenne dans tous les environnements, ce qui les rend plus stables.

- **Coefficient de régression (b_i)**

Selon Finlay et Wilkinson (1963), la régression de pente (b_i) mesure la réponse d'un génotype à un indice environnemental basé sur la performance moyenne de tous les génotypes dans chaque environnement. Si (b_i) ne varie pas significativement de 1, le génotype est considéré comme adapté à tous les environnements. Un $b_i > 1$ indique que le génotype est plus sensible aux variations environnementales et est mieux adapté aux environnements à haut rendement, tandis qu'un $b_i < 1$ reflète une meilleure résistance aux variations environnementales, augmentant ainsi l'adaptabilité aux environnements à faible rendement.

- **Écart par rapport à la régression (S^2_{di})**

L'écart par rapport à la régression (S^2_{di}) est souvent utilisée comme paramètre pour sélectionner des génotypes stables. Les génotypes avec un S^2_{di} égale à 0 sont considérés comme les plus stables, tandis qu'un S^2_{di} supérieure à 0 indique une stabilité inférieure à travers les environnements. De ce fait, les génotypes présentant des valeurs inférieures de S^2_{di} sont les plus souhaitables.

- **La variance de stabilité de Shukla (σ^2_i)**

Shukla (1972) a proposé la variance de stabilité du génotype (i), définie comme la variance entre les environnements après avoir éliminé les effets principaux des moyennes environnementales. Selon cette mesure, les génotypes avec des valeurs minimales de variance de stabilité sont considérés comme plus stables.

- **Coefficient de variance (CV_i)**

Francis et Kannenberg (1987) ont proposé le coefficient de variation (CV_i) comme une mesure de la stabilité, en combinant le coefficient de variation, le rendement moyen et la variance environnementale. Les génotypes avec un CV_i faible, une variance environnementale (EV) réduite et un rendement moyen supérieur sont observés comme les plus désirables.

5-6-1-2 Les indices non paramétriques

- **Statistiques non paramétriques de Huhn et Nassar et Huhn**

Quatre statistiques non paramétriques ont été proposées par Huhn (1990) et Nassar et Huhn (1987) pour évaluer la stabilité des génotypes: (1) S (1), la moyenne des différences absolues de rang d'un génotype à travers tous les environnements testés ; (2) S (2), la variance des

rangs entre les environnements ; (3) S (3), la somme des écarts absolus de chaque génotype par rapport à la moyenne des rangs ; et (4) S (6), la somme des carrés des rangs pour chaque génotype par rapport à la moyenne des rangs. Pour calculer ces statistiques, les rendements moyens doivent être transformés en classements pour chaque génotype et chaque environnement. Les génotypes sont considérés comme stables si leurs classements sont similaires à travers tous les environnements. La valeur minimale de chacune de ces statistiques indique une grande stabilité pour un génotype donné.

- Statistiques non paramétriques de Thennarasu

Quatre statistiques non paramétriques (NP 1–4) définies par Thennarasu (1995) constituent un ensemble alternatif pour mesurer la stabilité. Ces statistiques sont basées sur les rangs des moyennes ajustées des génotypes dans chaque milieu. De faibles valeurs de ces statistiques témoignent d'une grande stabilité des génotypes.

Selon Nassar et Huhun (1987), pour utilisation des statistiques de stabilité paramétriques et leurs tests de signification, des hypothèses doivent être formulées sur l'homogénéité de la distribution et de la variance. Néanmoins, les mesures de stabilité non paramétriques sont sans distribution et ne sont pas affectées par les valeurs aberrantes comme le sont les estimations paramétriques. Les statistiques de stabilité non paramétriques peuvent être basées sur les classements plutôt que sur les valeurs X mesurées (Becker et Leon, 1988). Ainsi, chaque méthode a ses propres bénéfices et limites, la majorité des sélectionneurs combinent ces approches pour l'identification des génotypes stables et désirables.

5-7 La sélection assiste par marqueur moléculaire

La découverte des marqueurs moléculaires a ouvert une nouvelle ère pour la sélection classique. Elle a rendu possible l'identification et l'étiquetage de certains gènes, ainsi qu'une gestion et une manipulation plus efficaces de la variabilité génétique, facilitant ainsi la construction de génotypes qui accumulent des gènes favorables (Kadi, 2012). Ces marqueurs moléculaires sont désormais un outil nécessaire pour l'amélioration des plantes, offrant de nouvelles opportunités aux sélectionneurs (Abdellaoui et *al.*, 2012). Grâce aux marqueurs moléculaires, il est désormais possible, d'une part, de mieux interpréter le génotype à travers le phénotype et, d'autre part, de réguler les recombinaisons entre les locus concernées. Ceci est d'autant plus pertinent que les marqueurs moléculaires sont absolument peu affectés par les fluctuations environnementales. Ils sont aussi indépendants de l'organe mesuré ou analysé et du stade de développement de l'organisme étudié (Kadi, 2012).

Les marqueurs moléculaires permettent d'établir des cartes génétiques qui consistent à ordonner les marqueurs le long du génome. De telles cartes représentent une base pour identifier et localiser des gènes (pour les caractères à hérédité simple dirigés par l'action d'un seul gène) et des QTL (pour les caractères quantitatifs gouvernés par l'action combinée de plusieurs gènes) d'intérêt agronomique (Fellahi, 2017).

Selon Virilouvet (2011), la sélection assistée par marqueurs (SAM) repose sur la variabilité naturelle de l'espèce ciblée et les études de détection des loci de caractères quantitatifs (QTL). Cela permet de stimuler le processus de sélection en guidant de manière réfléchie le choix des génotypes qui regroupent le plus grand nombre de caractères favorables. Cette méthode de sélection est particulièrement avantageuse pour les sélectionneurs, car elle permet une sélection plus efficace, rapide et précoce. Elle s'avère ainsi être un complément précieux aux techniques traditionnelles d'amélioration génétique des céréales (Najimi et *al.*, 2003).

Il existe différents types de marqueurs moléculaires, tels que les polymorphismes de longueur des fragments de restriction (RFLP), séquences répétées en tandem (SSR), les polymorphismes mononucléotidiques (SNP) et les polymorphismes d'insertion/délétion (InDels). Chaque type présente des avantages et des applications spécifiques, ce qui en fait des outils précieux pour les différentes étapes de la sélection végétale. Avec l'avènement des technologies de séquençage à haut débit, le génotypage d'un grand nombre de marqueurs est devenu de plus en plus réalisable et rentable. En outre, les marqueurs moléculaires ont non seulement accéléré le processus de sélection, mais ont également ouvert la voie à une manipulation génétique plus précise grâce à des techniques telles que le rétrocroisement assisté par marqueurs et l'édition du génome. Cette approche de sélection de précision garantit que seuls les traits génétiques souhaités sont introduits ou modifiés, minimisant ainsi les altérations involontaires associées aux méthodes de sélection traditionnelles (Mirmohammadi Maibody et Golkar, 2019 ; Meena et *al.*, 2023).

Chapitre II

**Évaluation du comportement agro
physiologique de quelques génotypes de blé dur
(*triticum durum* Desf.) Sous conditions semi
arides**

الملخص

يعتمد محسنوا النبات على تطوير أنماط وراثية ذات إنتاجية عالية والتي يمكن أن تنمو في المناطق شبه الجافة المعرضة لمختلف التغيرات المناخية القاسية. تم إجراء تجارب ميدانية خلال موسمين زراعيين 2022-2021 و 2022-2023 على مستوى الحقول التجريبية التابعة للمعهد التقني للزراعات الواسعة (ITGC) سطيف. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء 10 أنماط وراثية من القمح الصلب من خلال دراسة بعض المؤشرات الفيزيولوجية والزراعية تحت الظروف شبه الجافة. تمت الدراسة التجريبية الحقلية وفق التصميم العشوائي بالأجنحة بثلاث تكرارات. أظهر تحليل التباين للموسمين أن تأثير النمط الوراثي كان معنوياً بالنسبة لمعظم المؤشرات المدروسة، بالإضافة إلى وجود تفاعل معنوي بين النمط الوراثي والموسم الزراعي. استجابت الأنماط الوراثية المختبرة خلال هذه الدراسة بشكل مختلف من موسم زراعي إلى آخر. كان الموسم 2022-2021 هو الأكثر ملاءمة لتحقيق أفضل مردود حبي، حيث كانت الأنماط الوراثية G3 (35,23 ق/هـ)، G2 (34,86 ق/هـ) و G5 (28,9 ق/هـ) هي الأكثر مردودية. بالإضافة إلى ذلك، حافظوا على أعلى نسبة من المحتوى المائي (% 81,09، % 84,95 و % 84,34 على التوالي) وأقل درجات حرارة في هذه الظروف. أظهرت نتائج الانحدار الخطي البسيط أن المردود الحبي ارتبط سلباً بدرجة حرارة الغطاء النباتي وإيجابياً باستقرار الغشاء.

الكلمات المفتاحية: القمح صلب، شبه جافة، المردود، الأداء، فيزيولوجية.

RESUME

Les sélectionneurs se basent sur le développement de génotypes à haut rendement pouvant pousser dans les régions semi-arides soumises à différents stress abiotiques. Des expérimentations de terrain ont été menées durant deux campagnes agricoles, 2021-2022 et 2022-2023, dans les champs expérimentaux de l'ITGC, à Sétif. Le but de cette étude est d'évaluer les performances de 10 génotypes de blé dur pour les caractères agro-physiologiques dans des conditions semi-arides. Les génotypes évalués ont été cultivés dans un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions. L'analyse de la variance pour les deux saisons a montré que l'effet du génotype était significatif pour la plupart des paramètres étudiés, ainsi que l'existence d'une interaction génotype-année significative. En effet, le matériel végétal évalué a répondu différemment d'une année à l'autre. La saison 2021-2022 a été la plus favorable pour l'expression du meilleur rendement en grains, où les génotypes G3 (35,23 q ha⁻¹), G2 (34,86 q ha⁻¹) et G5 (28,9 q ha⁻¹) ont été les plus productifs. De plus, ils ont maintenu la teneur en eau la plus élevée (81,09 %, 84,95 % et 84,34 % respectivement) et les températures les plus basses dans ces conditions. La régression linéaire simple a montré que le rendement en grains était négativement corrélé à la température du couvert végétal et positivement lié à la stabilité membranaire.

Mots-clés : blé dur, semi-aride, rendement, performance, physiologique.

ABSTRACT

Breeders focus on developing high-yielding genotypes that can grow in semi-arid regions subject to different abiotic stresses. Field experiments were conducted during two agricultural seasons 2021-2022 and 2022-2023 in the experimental fields of ITGC, Setif. This study aims to evaluate the performance of 10 durum wheat genotypes for agrophysiological traits growing in semi-arid conditions. The assessed genotypes were grown in a completely randomized block design with three replications. Analysis of variance for the two seasons showed that the effect of the genotype was significant for most of the parameters studied, as well as the existence of a significant genotype-year interaction. The plant material evaluated responded differently from one year to another. The 2021-2022 season was the most favorable for the expression of higher grain yield, where genotypes G3 (35.23 q ha⁻¹), G2 (34.86 q ha⁻¹), and G5 (28.9 q ha⁻¹) were the most productive. In addition, they maintained the highest water content (81.09%, 84.95%, and 84.34% respectively) and the lowest temperatures under these conditions. Simple linear regression showed that grain yield was negatively correlated with canopy temperature and positively related to membrane stability.

Keywords: durum wheat, semi-arid, yield, performance, physiological.

INTRODUCTION

La culture céréalière est une activité ancienne dans le milieu agricole algérien, pratiquée dans toutes les régions, y compris la zone saharienne, avec une prédominance de la culture du blé dur (Chourghal et *al.*, 2023). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une espèce céréalière importante cultivée dans le monde entier sur près de 17 millions d'hectares (Xynias et *al.*, 2020). En outre, c'est une culture centrale cultivée en Algérie, et sa production repose sur l'adoption de variétés modernes issues du matériel végétal du CIMMYT (Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé), de l'ICARDA (Centre International de Recherche Agronomique dans les zones arides), ainsi que des cultivars traditionnels dérivés de variétés du patrimoine local. Néanmoins, la production de blé dur ne couvre que 24 à 55 % de la consommation annuelle du pays (ITGC, 2022 ; Djoudi et *al.*, 2024), et n'arrive pas à répondre aux besoins du pays, estimés à 8,5 millions de tonnes par an (Hannachi et Fellahi, 2023). Cette faible production s'explique souvent par des conditions climatiques imprévisibles, des longues saisons sèches, des précipitations irrégulières et des sols pauvres en nutriments, qui caractérisent particulièrement les régions semi-arides (Krishnamurthy et *al.*, 2011). Ainsi, Hussain et *al.* (2018) ont déclaré que plusieurs stress abiotiques, tels que la sécheresse, le froid, les températures élevées et la salinité, affectent fortement la croissance, le développement et le rendement des plantes. En effet, la sécheresse est l'un des facteurs abiotiques les plus importants qui réduisent le rendement en conditions pluviales. Les variétés de blé dur cultivées en zone sèche doivent pouvoir tolérer le stress hydrique et thermique pour améliorer leur potentiel de rendement en grains (Mekaoussi et *al.*, 2021). Selon Bendjama et Ramdani (2021), le stress hydrique constitue la contrainte majeure, diminuant le rendement et la production potentielle. Mamrutha et *al.* (2022) mentionnent que la sécheresse est l'un des facteurs critiques réduisant le rendement du blé au niveau mondial. Il peut survenir à chaque stade de croissance de la plante et entraîne une série de modifications morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires chez les plantes (Bendada, 2021). La sécheresse affecte également négativement la teneur relative en eau, les échanges gazeux et la teneur en chlorophylle (Othmani et *al.*, 2019). Melandri et *al.* (2020) ont également observé que le stress dû à la sécheresse réduisait la conductance stomatique, ce qui entraînait une augmentation de la température des feuilles en limitant la transpiration. En outre, Bali et Sidhu (2019) ont indiqué que la teneur relative en eau des feuilles est le principal facteur qui ralentit la croissance du blé en réponse au stress dû à la sécheresse. La sécheresse a non seulement réduit la teneur en eau, mais aussi la teneur en chlorophylle (Keyvan, 2010). L'effet du stress dépend de son degré, de sa durée et du stade de développement. Durant les

premiers stades de croissance, le stress implique de multiples altérations morphologiques et physiologiques au cours de la germination (Jian et *al.*, 2016). Également, pendant les périodes de floraison et de remplissage des grains, la sécheresse peut diminuer le nombre de talles fertiles, la fertilité des épis, le poids des grains, et la biomasse aérienne (Pour-Aboughadareh et *al.*, 2020). L'amélioration du rendement en grains a été un objectif principal de la plupart des programmes de sélection. Ainsi, le développement de variétés tolérantes à la sécheresse avec un rendement en grains élevé était un objectif majeur des sélectionneurs de blé (Mohammedi et *al.*, 2014 ; Mao et *al.*, 2022). Plusieurs caractères physiologiques, tels que la teneur relative en eau, la fuite d'électrolytes, la teneur en chlorophylle et la température du couvert végétal, ont été utilisés comme critères de sélection des génotypes souhaitables avec un rendement élevé et une tolérance au stress. Sallam et *al.* (2019) ont considéré les caractères physio-biochimiques comme des critères importants pour la sélection dans les conditions environnementales stressantes. De même, la sélection des génotypes en fonction du rendement est facilitée par les critères morphologiques et physiologiques liés au rendement dans les conditions de sécheresse (González-Ribot et *al.*, 2017). La présente étude vise à évaluer le comportement agro-physiologique de dix génotypes de blé dur, afin d'identifier les principaux critères de sélection en conditions semi-arides.

MATERIELS ET METHODES

1- Site de l'expérimentation

L'expérimentation a été réalisée durant deux campagnes agricoles, 2021-2022 et 2022-2023, dans les champs expérimentaux de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif (ITGC-AES, 36°12'N et 05°24'E, à 1 081 m d'altitude, Algérie). Le climat de la région est de type méditerranéen semi-aride, caractérisé par un été chaud et sec et un hiver froid et humide. Le site est caractérisé par des terres plates, peu fertiles et un fort risque de gel tardif ainsi que de sécheresse en fin de cycle. Le sol est de texture limono-argileuse, avec un taux moyen en matière organique de 2,8 % (Chennafi et *al.*, 2006).

2-Le matériel végétal

Le matériel végétal testé est constitué de 10 génotypes, dont 3 variétés locales (Bousselam, Boutaleb, Oued el Bared), un génotype introduit (Jupare C 2001) et 6 lignées (Tableau 1). Les génotypes ont été semés dans un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions. Chaque parcelle se compose de 6 rangs, mesurant 5 mètres de longueur et 1,2 mètre de largeur, espacés de 0,2 mètre entre les lignes. Le dispositif a été entretenu par une

fertilisation azotée (Urée 46) en deux apports aux stades épi à 1 cm (40 kg/ha) et au stade fin de tallage (45 kg/ha), ainsi qu'un traitement herbicide anti-dicotylédones (Mustang à 0,60 l/ha) et anti-monocotylédones (Topika à 0,75 l/ha) en fin de tallage.

Tableau 1. Le pedigree et l'origine des génotypes testés.

Génotype	Pedigrees
G1	RASCON_37/GREEN_2/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/...
G2	MINIMUS_6/PLATA_16//IMMER/3/SOOTY_9/RASCON_37/9/...
G3	CMH77.774/CORM//SOOTY-9/RASCON-37/3/SOMAT-4
G4	CNDO/PRIMADUR//HAI-OU-17/3/SNITAN/4/SOMAT-3/
G5	CNDO/VEE//CELTA/3/PATA_2/6/ARAM_7//CREX/ALLA/5/ENTE/...
G6	SILVER 14/MOEWE//BISU_1/PATKA_3/3/PORRON_4/YUAN_1/9/...
Jupare C 2001	STINKPOT//ALTAR-84/ALONDRA
Bousselam	Heider/Martes/Huevosde Oro. ICD-414
Boutaleb	GTA dur /Ofanto
Oued el bared	Hedba3/Ofanto

3-Les suivis et notations

3-1 Les paramètres physiologiques

3-1-1- La teneur relative en eau (TRE)

La teneur relative en eau est un indicateur largement utilisé pour mettre en évidence l'état hydrique d'une plante (Houasli et *al.*, 2013). La teneur relative en eau est déterminée au stade épiaison sur un échantillon de cinq feuilles selon la méthode de Barrs et Weatherley (1962). Les feuilles collectées sont coupées au niveau de la base du limbe et immédiatement pesées pour obtenir leur poids frais (PF, mg). Elles sont ensuite placées dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée pendant 24 heures. Les feuilles sont à nouveau pesées pour obtenir leur poids turgide (PT, mg). Les échantillons sont enfin séchés à l'étuve pendant 24 heures à 65 °C pour obtenir le poids sec (PS, mg). Les valeurs de la teneur relative en eau sont déduites à partir de la formule suivante : **TRE (%) = [(PF-PS) / (PT- PS)] × 100**

3-1-2 La stabilité membranaire (MSI %)

La stabilité membranaire est mesurée à travers la quantité d'électrolytes libérés hors de la cellule lors d'un choc osmotique. La libération relative des électrolytes indique le degré de stabilité membranaire. La libération relative d'électrolytes des tissus foliaires est mesurée selon la méthode décrite par Baji et *al.* (2001). Les deux dernières feuilles entièrement développées ont été collectées, lavées à l'eau courante, puis découpées en segments de 1 cm

de longueur. Les échantillons ont été placés dans des tubes contenant 10 ml d'eau distillée, agités manuellement et laissés à la température ambiante du laboratoire. 24 heures après, une première lecture (EC1) est effectuée à l'aide d'un conductimètre. La conductivité finale (EC2) a été mesurée après avoir placé les tubes dans un bain-marie à 100 °C pendant 1 heure. Le pourcentage de cellules endommagées par le stress hydrique est estimé selon la formule suivante : **MSI % = 100 (EC1/ EC2).**

3-1-3- La teneur en chlorophylle (CHL)

La teneur en chlorophylle de la feuille est mesurée à l'aide d'un chlorophyllomètre digital (CCM200 Plus) (Figure 5).



Figure 5. Le mesure de la teneur en chlorophylle à l'aide d'un appareil CCM-200 plus.

Cet appareil permet de mesurer l'absorbance de la lumière dans les feuilles sans altérer celles-ci. La valeur obtenue correspond à la moyenne de 4 mesures effectuées le long de la partie médiane de la feuille étandard.

3-1-4 La température du couvert végétale (TCV)

Les mesures de la température du couvert végétal (TCV, °C) ont été prises au stade épiaison lors d'une journée ensoleillée à l'aide d'un thermomètre infrarouge portable (Fluke Corporation, Everett, WA, USA) (Figure 6). Les lectures ont été effectuées entre 11h00 et 14h00.



Figure 6. Le mesure de la température à l'aide d'un thermomètre infrarouge portable (Fluke Corporation. Everett.WA. USA).

3-1-5 La durée de la phase végétative (DPV)

La durée de la phase végétative (DPV, jours) est comptée en jours à partir de la levée jusqu'à l'épiaison, accomplie par la sortie de 50 % des épis de la gaine de la feuille étendard.

3-1-6 La surface de la feuille étendard (SF)

La surface de la feuille étendard (SF, cm²) est calculée selon Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990). Cinq feuilles fraîches sont collectées au stade épiaison, dont la longueur (L) et la largeur (l) sont mesurées, et la surface est calculée comme suit : **SF (cm²) = 0,607 (L × l).**

3-2 Les paramètres agronomiques

3-2-1 Le rendement en grains (RDT, q. ha⁻¹)

Le rendement en grains de chaque génotype est déterminé sur un mètre linéaire, puis converti en quintaux par hectare.

3-2-3 Le poids de mille grains (PMG, g)

Le poids de mille grains est mesuré en déterminant le poids moyen de 250 grains pour chaque génotype. Ensuite, à l'aide de la règle de trois, on calcule le poids de 1000 grains.

3-2-4 le nombre d'épis/m² (NE/m²)

Le nombre d'épis par mètre carré est estimé en comptant le nombre d'épis par mètre linéaire, puis en convertissant cette mesure pour obtenir le nombre d'épis par mètre carré.

3-2-5 Le nombre des grainais par épis (NG/épi)

On calcule le nombre de grains de cinq épis choisis, puis on divise la somme obtenue par le nombre d'épis pour obtenir la moyenne de grains par épi.

3-2-6 La biomasse arienne (BIO, q. ha⁻¹)

Le poids de la biomasse aérienne totale accumulée à maturité est déterminé à partir d'un échantillon de végétation récolté sur une bande de 1 mètre linière par parcelle élémentaire, puis converti en quintaux par hectare.

3-2-7 L'indice de récolte (IR %)

L'indice de récolte est calculé en faisant le rapport entre le rendement en grains et la biomasse aérienne mesurée à maturité.

3-2-8 La hauteur (HT, cm)

La hauteur des plantes est mesurée au stade de maturité à l'aide d'une règle graduée. La mesure est effectuée en prenant la distance entre le sol et le sommet de la plante.

4-Analyse statistique

Une analyse de variance a été réalisée au niveau de probabilité de 5 % pour tester les différences entre les génotypes, et des corrélations linéaires ont été effectuées pour étudier les associations entre les différentes variables à l'aide du logiciel Costat (6.400, 1998). Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel R Core Team.

RESULTATS ET DISCUSSION

1-Analyse des données climatiques

Les données climatiques de la période d'expérimentation ont été collectées à partir du site El Tiempo.

1-1 La température

Les températures moyennes mensuelles des deux saisons de culture 2021-2022 et 2022-2023 sont présentées à la figure 8. L'analyse du régime thermique des deux saisons montre que les températures les plus basses ont été enregistrées durant l'hiver, notamment en décembre, janvier et février, et qu'elles commencent à se redresser à partir des mois de mars et avril. Cela influence le début de la croissance de la végétation.

Le mois de janvier est le plus froid des deux saisons, 2021-2022 et 2022-2023, avec des températures moyennes de 4,3 °C et 4,1 °C respectivement. Le mois de juin de 2021-2022 est le plus chaud, avec une température élevée de 27,1 °C. En revanche, en 2022-2023, le mois de juin a été légèrement moins chaud, avec une température moyenne de 21,9 °C.

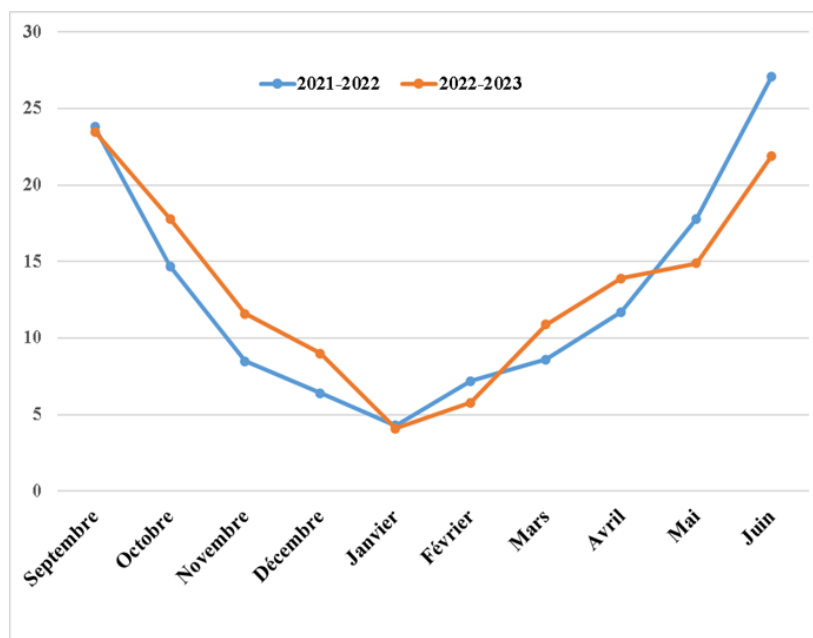


Figure 7. Températures moyennes mensuelle des deux années de culture 2021-2022 et 2022-2023.

1-2 La pluviométrie

Les cumuls pluviométriques enregistrés durant les saisons 2021-2022 et 2022-2023, de septembre à juin, sont respectivement de 332,26 mm et 360 mm, avec un écart de 27,74 mm entre les deux saisons (Figure 8).

La saison 2022-2023 est la plus pluvieuse, mais les précipitations ont été réparties de manière irrégulière. Des précipitations faibles ont été enregistrées durant la période cruciale pour le développement de la culture, notamment en février, mars et avril, avec un cumul de

26,2 mm. Un pic significatif a été enregistré durant le mois de mai, avec un cumul de 114,8 mm.

La distribution des précipitations est favorable pour la saison 2021-2022. Les plus grandes quantités de précipitations ont été enregistrées durant les mois de septembre, novembre, mars et avril, avec respectivement 41,42 mm, 86,4 mm, 46,98 mm et 82,29 mm (Figure 7). En revanche, les mois les moins pluvieux sont octobre, mai et juin.

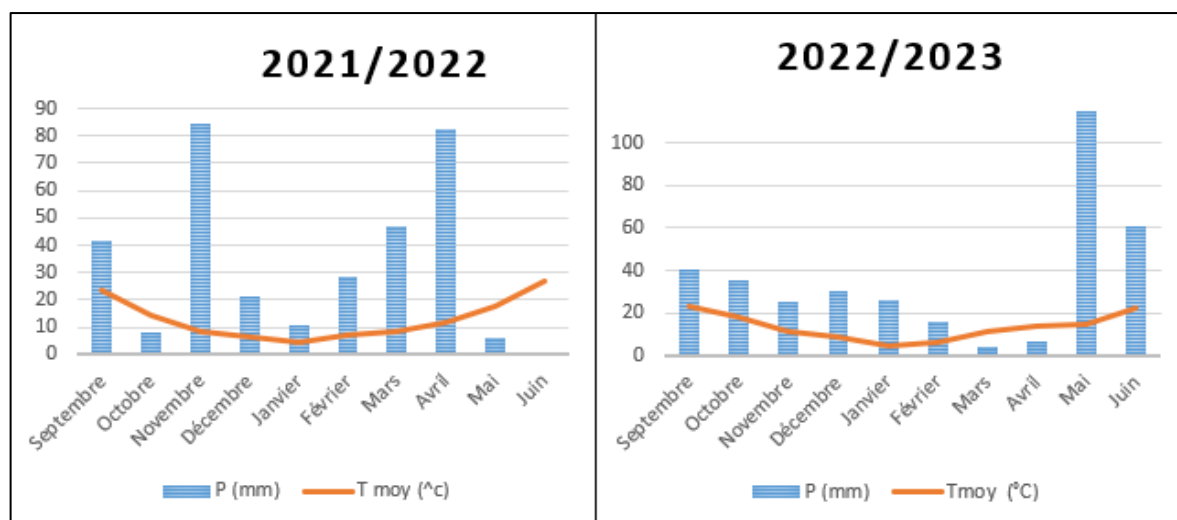


Figure 8. La distribution de la pluviométrie et la température moyenne mensuelle pour les deux saison 2021-2022 et 2022-2023.

1- Evaluation des paramètres physiologiques

L'analyse de la variance pour les paramètres physiologiques durant les deux années 2021-2022 et 2022-2023 est illustrée dans le tableau 2. On constate un effet significatif des géotypes sur le matériel évalué pour tous les paramètres physiologiques, à l'exception de la température végétale et de la stabilité membranaire.

Tableau 2. Carrés moyens de l'analyse de la variance pour deux années des variables physiologiques mesurées.

Source de variation	Df	CHL	TRE	MSI	SF	DPV	TCV
Géotype	9	105,29***	131,45**	259,174 ^{ns}	10,761***	9,77**	2,8 ^{ns}
Année	1	387,85***	956,44***	53,51 ^{ns}	3511,33***	28732,817***	165,66***
Géotype x année	9	66,91***	90,72 ^{ns}	117,83 ^{ns}	9,15***	12,22***	5,67*
Error	38	12,5	45,01	137,30	0,64	2,84	2,51

CHL : teneur en chlorophylle, TRE : teneur relative en eau, MSI : Stabilité membranaire, SF : surface foliaire, DPV : duré de la phase végétative, TCV : température du couvert végétale, * significative ($P < 0.05$), ** significative ($P < 0.01$), non significative (ns).

L'analyse combinée montre un effet significatif de l'interaction génotype-année pour les caractères physiologiques, à l'exception de la teneur en eau et de la stabilité membranaire. Ces fluctuations intersaisonnières sont dues aux variations climatiques d'une année à l'autre.

2-1 Détermination de la teneur relative en eau (TRE)

La teneur relative en eau des feuilles est souvent utilisée pour estimer que la réponse d'une plante au stress ; c'est un indicateur important de l'état hydrique des feuilles (Kohila et Gomathi, 2018). Les analyses de variance révèlent un effet significatif du génotype sur la teneur relative en eau au cours des deux campagnes expérimentales, 2021-2022 et 2022-2023. En 2021-2022, la lignée G4 (91,24 %) maintient une teneur relative en eau élevée, alors que la variété locale Oued el Bared se caractérise par une faible valeur (70,19 %), avec une moyenne générale de 82,82 %. Tandis qu'en 2022-2023, les deux lignées G1 et G3 se distinguent par les meilleures valeurs de la teneur relative en eau, avec 86,08 % et 84,43 % respectivement (Tableau 3). L'analyse de la variance combinée (Génotype X Année) a montré une différence non significative, ce qui explique que les campagnes n'affectent pas l'expression de la variable mesurée, et que le comportement des génotypes testés est similaire pour les deux campagnes. Zoghmar et Kara (2019) constatent que le stress hydrique induit une diminution remarquable du rapport de l'eau dans la plante, qui s'accroît à mesure que le niveau de stress devient sévère. Les génotypes qui maintiennent une teneur relative en eau plus élevée, assurant ainsi une meilleure hydratation, ont montré une meilleure capacité de résistance à la sécheresse (Kardile et al., 2018). De plus, les résultats de Bayoumi et al. (2015) ont révélé que les génotypes de blé maintenant une teneur en eau plus élevée sous des conditions de stress étaient considérés comme tolérants à la sécheresse et présentaient un rendement en grains élevé. Ainsi, la capacité de maintenir un potentiel hydrique élevé a été considérée comme un mécanisme qui permet à la plante d'esquiver la déshydratation (Houasli et al., 2013). De plus, le maintien d'une teneur en eau équilibrée est une condition nécessaire pour le développement stable d'une plante (Bouchemal, 2018).

2-2 La teneur en chlorophylle totale (CHL)

Les résultats de la teneur en chlorophylle des génotypes testés sont illustrés dans le tableau 3. L'analyse de la variance révèle un effet génotype très hautement significatif. La valeur moyenne de la chlorophylle totale de la première saison 2021-2022 est de 42,83 cci, dont les valeurs maximales sont enregistrées par les génotypes G1, Jupare C 2001, et Boutalab avec 50,03, 51,2 et 51,3 cci respectivement. Tandis que les valeurs minimales sont marquées chez la lignée G5 (32,36 cci) et la variété locale Oued el Bared (34,43 cci). Pour la deuxième

saison de culture 2022-2023, la teneur en chlorophylle varie de 32,7 cci chez la lignée G2 à 41,66 cci chez la lignée G6, avec une moyenne générale de 37,75 cci. On constate que la première saison 2021-2022 était plus appropriée pour l'expression d'une meilleure teneur en chlorophylle que la deuxième année. Cette variation intersaison peut s'expliquer par les faibles précipitations au cours de la deuxième année, qui entraînent une dégradation de la teneur en chlorophylle des feuilles. Ainsi, plusieurs travaux ont rapporté que la teneur en chlorophylle des feuilles était significativement affectée par de nombreux facteurs environnementaux (Kaya *et al.*, 2015 ; Atar *et al.*, 2020).

L'interaction génotype X année était très hautement significative pour ce caractère, ce qui suggère que les génotypes testés dans cette étude étaient fortement influencés par les variations des années. Des résultats similaires ont été rapportés par Bendada (2021), qui affirment que les années affectent significativement l'expression de la variable teneur en chlorophylle. La teneur en chlorophylle des feuilles est un indicateur majeur de la capacité photosynthétique des tissus végétaux. La dégradation de la teneur en chlorophylle est un indicateur pour évaluer l'influence du stress environnemental sur le développement et le rendement des plantes (Kohila *et al.*, 2018). Selon Yang *et al.* (2022), les génotypes tolérants à différents stress réagissent par une faible perte de la chlorophylle et maintiennent ainsi une plus grande efficacité photosynthétique. De même, Mansouri *et al.* (2018) déclarent que les conditions de sécheresse accélèrent la dégradation de la teneur en chlorophylle, réduisant ainsi la surface foliaire et la photosynthèse ; ainsi, les génotypes qui restent verts avec une sénescence retardée peuvent améliorer leurs performances dans des conditions de sécheresse. Naveed *et al.* (2014) ont signalé que les génotypes du blé sont influencés négativement par un stress hydrique sévère à plusieurs stades de croissance, ce qui réduisait l'assimilation du CO₂, la conductance stomatique, le taux de transpiration et la teneur en chlorophylle et inhibait plus tard le rendement en grains aux stades de tallage et de floraison.

2-3 La stabilité membranaire (MSI%)

La mesure de la libération relative d'électrolytes est considérée comme un critère pour évaluer l'intégrité de la membrane en réponse aux stress environnementaux (Slama *et al.*, 2018). L'analyse de variance révèle que la différence est non significative pour l'effet génotype, année et interaction année X génotype. Selon les données affichées (Tableau 3), les valeurs de la campagne 2021-2022 variaient de 48,34 à 90,93 %, avec une moyenne générale de 78,06 %. La variété locale Oued el Bared présente la valeur la plus faible, ce qui indique qu'elle était le génotype le plus tolérant. Alors que la lignée G3 était la plus sensible avec la

valeur la plus élevée. Au cours de la deuxième année, les valeurs s'étalent de 70 % pour la variété locale Boutaleb à 85,39 % pour la lignée G5, avec une moyenne générale de 77,84 %. Selon Chowdhury et al. (2017), le maintien de la stabilité des membranes sous stress hydrique est un élément majeur de la résistance à la sécheresse des plantes. Ainsi, la capacité des membranes cellulaires à contrôler les mouvements des ions entrants et sortants des cellules est utilisée pour évaluer les dommages causés aux tissus (Massoumi et al., 2010). Ramadan et al. (2022) ont déclaré que la libération relative d'électrolytes augmente avec l'augmentation des niveaux de déficit hydrique. La stabilité de la membrane cellulaire est considérée comme un critère de sélection possible pour le rendement en grains puisqu'elle a une corrélation avec la performance des plantes dans des environnements stressés (Anzer et al., 2017). De même, les résultats de Rahman et al. (2016) ont montré que les génotypes de blé présentant une stabilité membranaire élevée produisaient un rendement en grains plus élevé. D'après les résultats de Slama et al. (2018), l'augmentation de la libération des électrolytes dans les conditions de stress est attribuée à la perturbation des membranes cellulaires, probablement résultant de la dégradation des protéines.

2-4 La température du couvert végétale (TCV)

La température du couvert végétal est une mesure indirecte du taux de transpiration et de la conductance stomatique, qui peut être utile pour déterminer les différences génotypiques dans la réponse à la sécheresse (Guendouz et al., 2021). Nos résultats indiquent qu'il n'existe aucune variation significative entre les génotypes évalués. Les deux lignées G2 et G3 ont présenté les températures les plus basses (22°C et 22,43°C respectivement), révélant ainsi une meilleure capacité à maintenir un bon état hydrique et à garantir une température inférieure à celle de l'air. Tandis que, la variété Boutaleb a enregistré la température la plus élevée (30,33°C) durant la première saison de culture. Pour la deuxième saison, la température variait de 28,83°C pour la variété Boutaleb à 31,48°C pour la lignée G3, avec une moyenne globale de 29,96°C (Tableau 3). Les génotypes de blé présentant une température foliaire basse pendant l'épiaison et le remplissage des grains peuvent être des indicateurs importants de la tolérance au stress hydrique (Thapa et al., 2018). Ainsi, d'après les résultats de Bazzaz et al. (2015), dans des conditions de déficit hydrique, la température foliaire des génotypes de blé a augmenté en raison d'une augmentation de la respiration et d'une diminution de la transpiration. De plus, nos résultats révèlent un effet année très hautement significatif, et une interaction (Génotype X année) significative, ce qui suggère que le comportement des génotypes évalués varie sur les deux saisons. Cette variation peut être due aux fluctuations des précipitations et des températures moyennes intersaisons. La campagne 2021-2022 a été la

plus favorable, où les génotypes affichent des températures basses, tandis que la deuxième campagne 2022-2023 montre une augmentation de la température de 17,12 %.

2-5 La surface foliaire (SF)

La surface de la feuille étendard est une variable très importante utilisée pour déterminer plusieurs processus, tels que la photosynthèse et l'évapotranspiration, qui jouent un rôle crucial dans la transformation énergétique (Alina et al., 2021). De même, la surface de la feuille étendard joue un rôle important dans la photosynthèse ; par conséquent, une plus grande surface foliaire est souhaitée dans les génotypes de blé (Ulah et al., 2021). L'analyse de la variance indique la présence d'une différence très hautement significative pour l'effet génotype, année, et aussi l'interaction génotype X année. Les moyennes des valeurs de la surface foliaire chez dix génotypes testés sont représentées dans le tableau 3 pour les deux saisons 2021/2022 et 2022/2023. Les valeurs moyennes observées durant la première saison varient de 18,85 cm² pour la lignée G2 à 26,74 cm² pour la lignée G5. Alors qu'en deuxième saison, l'ensemble des génotypes accusent une surface moyenne de 7,42 cm², la surface foliaire est importante chez les génotypes Boutaleb (8,029 cm²), Bousselam (7,97 cm²), et G5 (7,94 cm²), alors que la surface la plus réduite est présente chez la lignée G6 (6,96 cm²) et la variété locale Oued el Bared (6,56 cm²). La surface moyenne des génotypes de la première saison est plus importante que celle de la deuxième saison, nous avons enregistré un taux de réduction de 67,34 %. Ces fluctuations sont probablement dues aux variations des facteurs climatiques, où la deuxième année se distingue par des faibles précipitations et des températures élevées. En condition de stress hydrique, la diminution de la surface foliaire est une stratégie adoptée par les plantes pour diminuer leurs besoins et leurs pertes en eau (Salmi, 2015). De plus, Benmahammed et al. (2008) montrent qu'en raison de la fluctuation climatique et de la concentration des stress en fin de cycle, la stratégie d'évitement est théoriquement la plus avantageuse, car elle permet à la plante d'éviter le stress plutôt que de tenter de le contrer. En outre, la surface de la feuille étendard a joué un rôle important dans l'amélioration du rendement en grains du blé. Une feuille étendard plus large a tendance à produire plus de grains dans le blé (Tshikunde et al., 2019), et dans l'orge (Alqudah et al., 2015). De même, Guendouz et al. (2016) déclarent que le stress hydrique réduit considérablement la surface foliaire ; cela pourrait également diminuer la pression de turgescence et l'expansion cellulaire.

2-6 La durée de la phase végétative (DPV)

CHAPITRE II EVALUATION DU COMPORTEMENT AGRO PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES.

C'est une stratégie efficace lors de la sélection des génotypes dans des environnements stressés (Abdipour et *al.*, 2013). De plus, Kirouani et *al.* (2019) notent que dans les conditions de stress, les génotypes précoces sont capables d'éviter le manque d'eau, les vents secs et les températures élevées de fin de cycle. L'analyse des données montre l'existence d'une différence entre les génotypes (Tableau 3). La valeur moyenne la plus élevée est présente chez la variété Boutaleb (141,16 jours), tandis que Jupare C 2001 est le plus précoce avec une moyenne de 137,16 jours, et une moyenne globale de 117,56 jours pour la première campagne (Tableau 3). Cependant, la deuxième campagne a été la plus longue avec une moyenne générale de 161,33 jours dont les génotypes G2, Boutaleb, et Jupare C 2001 sont les plus précoces (159,33 jours) alors que la ligné G4 montre la durée de la phase végétative la plus longue (163,66). Nos résultats indiquent une interaction génotype X année hautement significative pour le caractère la durée de la phase végétative ce qui montre que les génotypes de blé testés sont effectivement affectés par les années. En outre, les résultats de Guendouz et *al.* (2021) confirment que la précocité joue un rôle très important dans la stabilité du rendement du blé dur dans les zones sèches qui sont caractérisées par des températures élevées et des vents chauds pendant la période de remplissage des grains.

Tableau 3. Les valeurs moyennes des caractères physiologiques des génotypes testé

Caractère	CHL (cci)		TRE %		MSI %		SF (cm)		DPV (jours)		TCV (°C)	
Année	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23
G1	50,03 ^a	40,13 ^{ab}	86,41 ^{ab}	86,08 ^a	71,36 ^{cd}	72,2 ^a	21 ^d	7,11 ^{ab}	138,83 ^b cde	160,6 6 ^{ab}	26,33 abc	29,28 ^{bc}
G2	39,4 ^d	32,7 ^c	81,09 ^b	76,59 ^{ab}	84,48 ^{abc}	79,02 ^a	18,85 ^e	7,59 ^{ab}	138,16 ^d e	159,3 3 ^b	22 ^d	29,28 ^{bc}
G3	42,7 ^c	35,53 ^{abc}	84,05 ^{ab}	84,43 ^a	90,93 ^a	83,51 ^a	26,74 ^a	7,33 ^{ab}	140,66 ^a b	163,3 3 ^a	22,43 cd	31,48 ^a
G4	43,26 ^c	41,16 ^{ab}	91,24 ^a	77,54 ^{ab}	70,29 ^d	81,81 ^a	20,93 ^d	7,36 ^{ab}	140,33 ^a bc	163,6 6 ^a	24,96 bcd	30,95 ^{ab}
G5	32,36 ^e	37,03 ^{abc}	84,34 ^{ab}	68,93 ^b	88,50 ^{ab}	85,39 ^a	26,63 ^a	7,94 ^a	140 ^{abcd}	162,3 3 ^{ab}	24,63 bcd	30,48 ^{abc}
G6	46,4 ^b	41,66 ^a	81,07 ^b	74,2368 ^{ab}	76,03 ^{bc} d	72,23 ^a	21,08 ^d	6,96 ^{ab}	138,66 ^c de	161,3 3 ^{ab}	25,76 bcd	30,38 ^{abc}
Jupare	51,2 ^a	40,03 ^{ab}	88,35 ^{ab}	67,34 ^b	79,60 ^{abc} d	78,94 ^a	22,43 ^{cd}	7,30 ^{ab}	137,16	159,3 3 ^a	25,66 bcd	29,08 ^{bc}
Bouss	37,26 ^d	34,76 ^{bc}	81,73 ^{ab}	69,87 ^b	85,60 ^{ab}	82,28 ^a	24,08 ^b	7,97 ^a	139 ^{bcde}	161 ^{ab}	27,46 ab	30,05 ^{abc}
Bout	51,3 ^a	35,11 ^{abc}	79,69 ^{bc}	69,85 ^b	85,47 ^{ab}	70 ^a	22,20 ^{cd}	8,02 ^a	141,16 ^a	159,3 3 ^b	30,33 a	28,83 ^c
OB	34,43 ^e	39,36 ^{abc}	70,19 ^c	73,45 ^{ab}	48,34 ^e	73,02 ^a	23,23 ^{bc}	6,56 ^b	140,5 ^{abc}	163 ^{ab}	26,2 ^{ab} cd	29,83 ^{abc}
Moy	42,83	37,75	82,82	74,83	78,06	77,84	22,72	7,42	139,45	161,3 3	25,58	29,96
Min	32,36	32,7	70,19	67,34	48,34	70	18,85	6,56	137,16	159,3	22	28,83
Max	51,3	41,66	91,24	86,08	90,93	85,39	26,74	8,02	141,16	163,6 6	30,33	31,48
Diff %	11,86 ↓		9,65 ↓		0,3 ↓		67,34 ↓		15,69 ↑		3,8 ↑	

3-La performance agronomique des génotypes testés

L'analyse de la variance pour les caractères agronomiques pendant les deux années montre qu'il n'existe aucune différence entre les génotypes pour les paramètres agronomiques étudiés, à l'exception du rendement en grains et de la hauteur de la plante (Tableau 4). Ainsi, l'interaction génotypes révèle un effet hautement significatif pour le rendement en grains, le nombre d'épis et la hauteur de plante. Par contre, pour les variables poids de mille grains, la biomasse aérienne, et le nombre de grains/épis, l'interaction génotype année était non significative.

Tableau 4. Carré moyennes de l'analyse de variance des paramètres agronomiques mesurées chez les génotypes testés.

Source de variation	df	RDT	PMG	NE/m ²	NG/E	BIO	IR%	HT
Génotype	9	46,4*	18,55 ^{ns}	13045,41 ^{ns}	55,90 ^{ns}	720,02 ^{ns}	45,72 ^{ns}	295,23***
Année	1	7648,57***	8,09 ^{ns}	1540803,8***	5560,36***	77796***	4359,16***	55115,704***
Génotype x année	9	75,91***	17,35 ^{ns}	10288***	96,60 ^{ns}	675,32 ^{ns}	115,09*	61,77***
Error	3	16,32	22,22	6118	45,42	496,62	40,76	2,80

NE : nombre d'épi, NG/E : nombre des grains par épi, PMG : poids de mille grains, RDT : rendement en grains, BIO : la biomasse aérienne, IR% : indice de récolte, HT : la hauteur, * significative (P < 0.05), *** significative (P < 0.01), non significative (ns).

3-1 Le rendement en grains

La variation du rendement en grains des génotypes testés est illustrée dans tableau 5, Le rendement en grains est une caractéristique complexe déterminée par trois éléments : le nombre d'épis par surface, le nombre de grains par épi et le poids des grains. Le développement de cultivars de blé dur à haut rendement en grains dans les régions arides et semi-arides est l'objectif principal des programmes de sélection du blé (Feng et *al.*, 2018 ; Hu et *al.*, 2022). L'analyse statistique des données a révélé un effet génotype significative pour le rendement en grains. Pour la première saison 2021/2022, les lignées G3, G2, et G5 sont les plus productives avec 35,23, 34,86 et 28,96 q. ha⁻¹ respectivement et une moyenne générale de 24,4 q. ha⁻¹, ainsi les variétés Jupare C 2001 et Bousselam présentent une productivité modérée (22,83 et 27,4 q. ha⁻¹ respectivement). Néanmoins, Pour la deuxième saison le rendement le plus élevé est enregistré chez la lignée G1 (6,42 q. ha⁻¹) alors que la lignée G3 affiche le plus faible rendement en grains (1,08 q. ha⁻¹).

L'effet moyen montre que la saison 2021-2022 a été la plus favorable pour l'expression du rendement en grain avec 24,4 q. ha⁻¹ alors que la saison 2022-2023 était défavorable pour

l'élaboration d'un rendement élevé avec 2,82 q. ha⁻¹ avec un taux de diminution de 57,3 % par rapport à la première année. Ces variations du rendement entre les deux années sont dues aux températures élevées et les précipitations tardives du juin et mai de l'année 2022-2021 qui ont un impact négatif sur l'élaboration du rendement du blé.

Les variations du rendement en grains sont dues aux fluctuations climatiques où les températures élevées et les précipitations tardives ont un impact négatif sur l'expression du rendement. Dans ce contexte Barnabas et *al.* (2008) suggèrent que les conditions environnementales ont un impact majeur sur la capacité du génotype à produire des rendements en grains. De même, Messaoudi et *al.* (2021) mentionnent que le déficit hydrique et les températures élevées de fin de cycle entraîne une réduction du rendement en grains, cette diminution est causée par l'avortement de l'épillet, la stérilité du pollen qui impacte la fertilité de l'épi, ainsi que le dessèchement des feuilles ce qui empêche le transfert des assimilats au grain, affectant le poids de mille grains. Les résultats de Salimia et Atawnah (2014) indiquent que le rendement en grains le plus élevé a été obtenu sur les sites à fortes précipitations. Le développement de génotypes à haut rendement avec une stabilité et une adaptabilité acceptable est une méthode utile pour améliorer le rendement du blé dur dans des conditions de sécheresse (Pour-Aboughadareh et *al.*, 2022).

3-2 Le poids de mille grains

Chez les céréales le poids de 1000 grains (PMG) est un paramètre qui décrit la capacité d'accumulation des substances de réserves en conditions environnementales optimales. Le remplissage des grains se fait essentiellement par la translocation des assimilats issus de la photosynthèse. Les résultats d'analyse du poids de mille grains des génotypes testés pour les deux saisons ont montré un effet non significatif entre les génotypes, année.

Selon les résultats montrés dans le Tableau 6 les trois lignées G2, G3, G4 ont donné le meilleur poids des grains soit 32,4, 29,66, et 29,33 grains. Tandis que, les deux génotypes G6 et Jupare C 2001 affichent les faibles valeurs 27,06 et 27,03 grains respectivement cela pour l'année 2021-2022. En ce qui concerne la saison 2022-2023 les valeurs moyennes varient de 26,52 à 36 grains avec une moyenne globale de 31,2 grains. Les génotypes G1, G3, Bousselam et Boutaleb expriment les meilleurs poids de mille grains avec 33,03, 33,39, 34,07, et 36 grains respectivement.

La saison de culture 2022-2023 se détache en tête avec un poids de 1000 grains élevé de 31,20 grains. En revanche, la première saison 2021-2022 affiche le poids de 1000 grains le

plus faible 28,93 grains avec un déficit de 7,48. Ces fluctuations étant attribuables aux précipitations élevées des mois mai et juin de l'année 2023, es conditions climatiques coïncident avec une période cruciale pour le remplissage des grains, créant des conditions optimales, réduisant le stress hydrique et favorisant la maturation des grains. Après la floraison, un manque d'eau associé à des températures élevées entraîne une baisse du poids de 1000 grains par modification de la vitesse et/ou de la durée de remplissage, ce qui entraîne l'échaudage des grains (Hammami et *al.*, 2017). De plus Bennoui et *al.* (2019) notent que le poids de mille grains se diminue considérablement sous l'effet des fortes températures et d'un déficit hydrique au moment du remplissage du grain.

L'étude de Couvreur (1985), confirme que le poids de 1000 grains dépend de la phase de remplissage des grains, des conditions de l'alimentation hydrique et du niveau des températures de l'air. Par ailleurs, Bahlouli (2006) observe que lorsque le génotype n'arrive pas à produire un nombre élevé de grains, il compense par une augmentation du poids de 1000 grains, le degré de cette compensation pour minimiser la baisse du rendement en grain est variable selon les génotypes.

3-3 Le nombre d'épi/m²

Le nombre d'épis par mètre carré réfère à la capacité du blé à produire des talles, ce qui reflète son potentiel de rendement (Allali, 2015). Il est principalement dépendu du facteur génétique, de la densité de semis et de la capacité de tallage, laquelle est à son tour influencée par la disponibilité d'azote et l'approvisionnement en eau de la plante pendant la période de tallage (Benniou et *al.*, 2019). Nos résultats montrent des différences non significatives pour effet génotype, et très hautement significative pour effet année, ainsi que l'interaction génotype x année. Durant la première année le nombre des épis a étaient convergent chez les génotypes évalués, la valeur maximale a été constaté chez la variété Bousselam (335 épis) alors qu'une faible valeur est enregistrée chez les deux lignées G4 et G5 (210,83 épis) (Tableau 5). La deuxième saison de culture se distingue par une régression du nombre d'épi par avec un taux de 62,73 %, où les valeurs de nombre des épis s'étalent entre 68,33 épis pour le génotype G3 à 145 épis pour la variété Boutaleb. L'étude de Bouderssa (2021) confirme que les hautes températures et l'absence de pluie pendant les mois d'avril et mai ont eu un effet néfaste sur le nombre d'épi. De même, les résultats de Makhlouf et *al.* (2012) suggèrent que la présence d'un stress pendant la période des 10 jours précédant et après la date de réalisation du stade épiaison a des conséquences néfastes sur cette composante.

3-4 Le nombre des grains par épi

Le nombre de grains par épi a été suggéré comme un critère important pour améliorer le rendement en grains de blé, en particulier dans des conditions de sécheresse (Bogale et Tesfaye, 2016). La variation du nombre des grains par épi pour les deux saisons d'étude est illustrée dans le tableau 6.

L'ensemble des génotypes durant la saison 2021-2022 enregistrent une moyenne générale de 30,48 grains significativement supérieure à celle de la deuxième saison qui atteint 11,38 grains soit une variation de 65,13 %. Les trois lignées G3, G5, et G6 affichent le nombre des grains le plus élevé alors que la plus faible valeur est enregistrée chez le génotype introduit Jupare C 2001 cela pour la première année. Cependant, durant la deuxième année le nombre des grains variant de 15,63 grains à 25,5 grains, les lignées G1, G5, G6 se détachent en tête avec les meilleurs valeurs (22,7, 24, et 25,5 grains respectivement). Néanmoins, le génotype introduit Jupare C 2001 se distingue par un faible nombre de grains avec 15,63 grains.

Notre étude ressort qu'effet année est hautement significative, ce qui révèle que le nombre des grains influence par les variations entre les deux années d'étude. Ces résultats sont soutenus par Boudersa (2022) qui a noté que les températures élevées observées à la fin de cycle au cours d'une seule année d'étude ont causé des dommages importants aux épis ce qui entraîne la stérilité des épillets et diminué le nombre de grains par épi donc le rendement grain. De plus, le nombre des grains par épi est la composante du rendement la plus touchée et cela a été proposée comme un critère de sélection important pour la tolérance à la sécheresse (Allali, 2015). Ainsi, il est associé à la longueur de l'épi et au nombre d'entre-nœuds de l'inflorescence ainsi que le nombre d'épillets fertiles (Kovacevic et *al.*, 2018).

3-5 La biomasse aérienne totale

La variation de la biomasse aérienne des génotype testés pour les deux saisons est présenté dans le tableau 5. Durant la première saison nous remarquons que la valeur supérieure a été enregistrer chez la ligné G2 (165 q. ha⁻¹) alors que la valeur la plus faible est montré chez la ligné G6 n'accumule que 92,5 q. ha⁻¹. Pour la deuxième saison les moyennes de la biomasse aérienne varient de 33,83 q. ha⁻¹ pour la variété local Boutaleb à 48,66 q. ha⁻¹ pour la ligné G4.

Selon nos résultats le facteur année à révéler une différence très hautement significative cependant, durant la première année l'ensemble des génotypes accumulent 112,55 q. ha⁻¹

tandis que durant la deuxième saison nous avons constaté une diminution de 63,42 % dans l'accumulation de la biomasse, soit l'ensemble des géotypes n'accumulent que 40,53 q. ha⁻¹. Ces variations sont principalement dépendues des fluctuations climatiques durant l'année 2022-2023 ainsi qu'au durée de croissance de la culture qui peuvent affect significativement l'accumulation de la biomasse aérienne.

Selon Mazouz et Bouzerzzour (2017), la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison est aussi dépendante de la hauteur du chaume et de la durée de la phase végétative, Ainsi que, Benniou et *al.* (2019) affirment que les géotypes accumulant rapidement une biomasse élevée souffrent moins des stress de la post-anthèse qui sont plus fréquents. Les géotypes qui gardent une biomasse élevée sous conditions de stress hydrique peuvent être considérés comme plus tolérants vu que la biomasse conditionne le rendement et la translocation des assimilâts stockés temporairement au niveau de la tige et des feuilles (Bachiri, 2021). En outre, l'augmentation de la biomasse a été largement attribuée à un taux de photosynthèse élevé, à une conductance stomatique accrue, à un taux de chlorophylle élevé ainsi qu'à une meilleure efficacité d'utilisation des radiations (Tshikunde et *al.*, 2019).

3-5 L'indice de récolte

L'indice de récolte joue un rôle crucial dans l'évaluation du rendement des cultures et de l'impact de la culture. (Rabti, 2021). Il accélère la sélection visant à améliorer le potentiel de rendement en grains du blé (Tshikunde et *al.*, 2019). Les résultats illustrés dans le tableau 4 indique qu'il n'existe aucune différence significative entre les géotypes étudiés pour le caractère indice de récolte et un effet année très hautement significative. Pour la première saison d'étude les trois lignées G3, G6, et G5 ont distinguées par les meilleurs indices de récolte avec 32,75, 32,18 et 30,22 % respectivement. Alors que, les deux variétés Oued el bared et Boutaleb ont montrés les faibles valeurs de l'indice de récolte 16,23 et 16,20 % respectivement. Durant la deuxième saison d'étude les valeurs maximales ont révélé chez la lignée G1 (14,28 %) et Boutaleb (13,90 %), Tandis que la valeur minimale est enregistrée chez la lignée G3 (2,6 %). Les moyennes générales de la saison 2021-2022 et 2022-2023 sont 23,6 et 6,55 % respectivement nous constatons que la saison 2021-2022 a été la plus favorable pour l'expression d'indice de récolte (Tableau 5).

L'indice de récolte est un bon indicateur de la tolérance à la sécheresse et aux hautes températures de fin de cycle (Siddique et *al.*, 1989). Ainsi, Selon Dai et *al.* (2016) les

conditions environnementales notamment la température de l'air et les précipitations, exercent un effet sur l'indice de récolte et les rendements.

3-7 La hauteur de la plante

Les résultats de notre étude pour la hauteur de la plante des deux campagnes sont illustrés dans tableau 5. La hauteur de la plante est variée significativement pour l'ensemble des génotypes évalués ce qui révèle l'existence d'une grande variabilité entre les génotypes testés, ces résultats sont conformes à ceux de Benniou et *al.* (2019). Durant la campagne 2021-2022 nous remarquons que les valeurs de la hauteur varient de 92 cm pour la lignée G3 à 127 cm pour la variété Boutaleb avec une moyenne globale de 101,8 cm. Tandis que, pour la deuxième année la hauteur s'étale de 34,55 cm pour les deux lignées G3 et G5 à 52,44 cm pour la variété Boutaleb. La variété local Boutaleb a enregistré la meilleure hauteur pour les deux saisons de culture, cependant la première saison permet meilleure expression de la hauteur que la deuxième année la hauteur réduit avec un taux de 59,54 %. Des variations entre les années peut s'expliquer par les variations des conditions climatique durant les deux saisons. Bendada (2021) a rapporté que la hauteur de la plante varier d'un génotype à un autre et est étroitement influencé par les conditions du milieu. De même, les résultats de Abbadi (2015) montrent que les conditions environnementales en particulier la disponibilité de l'eau et la fertilité du sol ont un effet sur la hauteur des plantes.

La hauteur des plantes est un caractère important qui influence le rendement. Il s'agit également d'un objectif important pour la sélection agronomique et d'un indicateur essentiel pour représenter l'état de développement des cultures et l'absorption de l'azote au stade végétatif (Jiang et *al.*, 2020). Ainsi La hauteur de la plante du blé est très importante en termes de résistance à la verse. Selon (Steliana et *al.*, 2018 ; Bachiri, 2021) le processus de sélection repose sur la stabilité de certains paramètres tels que la hauteur de la plante, ce qui nécessite une réduction de l'impact des variations climatiques grâce à la réponse génétique des variétés.

CHAPITRE II EVALUATION DU COMPORTEMENT AGRO PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES.

Tableau 5. Les valeurs moyennes, maximales et minimales et signification statistique des caractères agronomiques mesurés.

Paramètre	RDT		PMG		NE/m ²		NG/E		BIO		HT		IR	
Année	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	21-22	22-23	22-23	22-23	21-22	22-23
G1	21,83 ^{bc}	6,42 ^a	28,8 ^{ab}	33,07 ^a	346,66 ^b	98,33 ^a	29 ^{bcd}	16,4 ^a	101 ^a	43,66 ^a	102 ^c	45,88 ^b	17,96 ^{ab}	14,28 ^a
G2	34,86 ^a	2,28 ^{ab}	32,4 ^a	28,36 ^a	556,66 ^a	108,33 ^a	26,66 ^{cd}	8,46 ^a	165 ^a	42,66 ^a	100 ^d	40 ^c	13,21 ^{ab}	4,98 ^{bc}
G3	35,23 ^a	1,08 ^b	29,66 ^{ab}	33,39 ^a	358,33 ^b	68,33 ^a	35 ^{abc}	8,6 ^a	116 ^{ab}	42 ^a	92 ^g	34,55 ^d	17,67 ^{ab}	2,60 ^c
G4	22,36 ^{bc}	2,29 ^{ab}	29,33 ^{ab}	26,52 ^a	346,66 ^b	75 ^a	30,66 ^{bcd}	13,86 ^a	102 ^b	48,66 ^a	100 ^d	42,33 ^b _c	13,01 ^{ab}	4,02 ^c
G5	28,96 ^{ab}	2,42 ^{ab}	28,66 ^{ab}	30,11 ^a	320 ^b	101,66 ^a	43 ^a	8 ^a	96,66 ^b	42 ^a	100 ^d	34,55 ^d	17,33 ^{ab}	4,44 ^c
G6	26,61 ^{bc}	2,42 ^{ab}	27,06 ^b	28,55 ^a	448,33 ^{ab}	86,66 ^a	38 ^{ab}	10 ^a	92,5 ^b	40,33 ^a	97 ^e	41,33 ^c	8,96 ^a	5,74 ^{abc}
Jupare	22,83 ^{bc}	1,28 ^b	27,03 ^b	30,53 ^a	400 ^{ab}	80	21 ^d	10,26 ^a	104,66 ^b	34,83 ^a	105 ^b	38,83 ^c	12,49 ^{ab}	3,57 ^c
Bousselam	27,4 ^{ab}	2,70 ^{ab}	28,53 ^b	34,07 ^a	553,33 ^a	116,66 ^a	28,66 ^{bcd}	15,46 ^a	128,66 ^{ab}	41,33 ^a	95 ^f	42 ^c	14,23 ^{ab}	6,55 ^{abc}
Boutalab	17,38 ^c	4,77 ^{ab}	28,66 ^b	36 ^a	376,66 ^b	145 ^a	24,66 ^{cd}	12 ^a	109,83 ^b	33,83 ^a	127 ^a	52,44 ^a	15,05 ^{ab}	13,9 ^{ab}
Oued el Bared	18,51 ^c	2,50 ^{ab}	29,2 ^{ab}	31,43 ^a	451,66 ^{ab}	73,33 ^a	29,66 ^{bcd}	10,73 ^a	109,16 ^b	36 ^a	100 ^d	39,88 ^c	10,81 ^b	5,39 ^{abc}
Moyenne	24,4	2,82	28,93	31,20	255,58	95,33	33,2	11,38	112,55	40,53	101,8	41,18	15,07	6,55
Min	17,38	1,08	27,06	26,52	320	68,33	21	8	92,5	33,83	92	34,55	10,81	2,60
Max	35,23	6,42	32,4	36	553,33	145	43	16,4	165	48,66	127	52,44	17,96	14,28
Diff %	57,3↓		7,48↑		62,73↓		65,13↓		63,42↓		59,54↓		56,53↓	

2- Les corrélations entre les paramètres mesurés

Les données présentées dans le tableau 6 ont montré les relations de rendement en grains et les différents paramètres évaluées durant les deux campagnes 2021-2022 et 2022-2023. La biomasse aérienne développe une association positive avec le nombre d'épis/m² ($r = 0,67^*$) ce qui suggère qu'un nombre d'épis plus élevés conduit à une biomasse importante, Ce résultat s'accorde avec ceux de Hannachi et *al.* (2013) ; Mecha et *al.* (2017). D'autre part, nos résultats indiquent une association positive et non significative entre la biomasse et le rendement en grain ($r = 0,62$) plusieurs chercheurs notent l'absence de corrélation entre la biomasse aérienne et le rendement en grain (Bennioui et *al.*, 2019 ; Maamri, 2019). De plus, Mansouri et *al.* (2018) signalent que la biomasse aérienne est un critère de sélection pour l'amélioration du rendement en grains, ainsi que le nombre d'épis, la paille, et le rendement économique. De même, le rendement en grains révèle une liaison négative et significative avec la hauteur de la plante ($r = - 0,639$) ce résultat corrobore avec celle de Wolde et *al.* (2016) qui ont observés une relation négative entre la hauteur des plantes et le rendement en grains. Le poids de mille grains est positivement et significativement liée avec l'indice de récolte ($r = 0,658^*$) l'étude de Upadhyay (2020) est indiquée le même résultat. De plus, Farnia et Tork (2015) ont rapportées que l'augmentation du poids des grains s'accompagne d'une augmentation de l'indice de récolte. D'ailleurs, la température du Canopé et le rendement en grains affichent une liaison négative et significative ($r = - 0,688^*$) ce résultat est en accord avec celle de Singh et *al.* (2022). Selon Sohail et *al.* (2020) les basses températures du couvert végétale dans les lignées de blé dur étaient associées à des rendements en grains plus élevés. Par ailleurs, Oulmi et *al.* (2020) ont remarqué qu'une température élevée du couvert végétale entraîne une diminution du rendement en grains. D'autre part, le rendement en grains et la stabilité membranaire sont significativement et positivement liées entre eux ($r = 0,683^*$), Cette relation peut s'expliquer par le fait que la stabilité membranaire renforce la résilience des plantes face au stress, permettant ainsi de préserver les processus physiologiques essentiels à la production des grains. De même, les résultats de Rehman et *al.* (2016) ont décrit que les génotypes de blé présentant une stabilité membranaire élevée produisaient un rendement en grains élevé.

Tableau 6. Les coefficients des corrélations entre les différents traits mesurés.

Variable	Chl	TRE	MSI%	SF	DPV	TCV	NG	NE	RDT	PMG	BIO	HT	IR
Chl	1												
TRE	0,381	1											
MSI%	-0,283	0,241	1										
SF	-0,433	-0,129	0,536	1									
DPV	-0,515	-0,109	0,3114	0,662	1								
TCV	0,277	-0,333	-0,246	0,1898	0,0087	1							
NG	-0,242	0,225	0,110	0,3803	0,641	0,1762	1						
NE	-0,373	-0,474	0,022	-0,327	-0,458	-0,068	-0,334	1					
RDT	-0,438	0,384	0,683	0,1864	0,1345	-0,688	0,223	0,215	1				
PMG	-0,240	-0,104	0,151	0,307	-0,127	0,215	-0,212	0,254	0,134	1			
BIO	-0,494	-0,197	0,287	-0,065	-0,252	-0,493	-0,350	0,729	0,622	0,528	1		
HT	0,398	-0,310	-0,341	-0,295	-0,260	0,6120	-0,409	0,064	-0,636	0,367	-0,135	1	
IR	0,2077	0,287	0,0605	0,0903	0,0420	0,3526	0,105	-0,173	-0,042	0,658	0,0632	0,516	1

3- Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP), l'une des méthodes d'analyse multivariée, clarifie parmi un ensemble de traits lesquels sont définitifs dans la distinction et la sélection génotypiques (Ara et al. 2018). Les données présentées dans le tableau 7 révèlent que quatre premiers composants présentaient une valeur propre proche ou supérieure à un. Les deux premiers axes de ACP représentent 51,16 % de la variation totale (28,17 et 22,99 % respectivement). D'après les résultats présentés dans la figure 9, l'axe 1 est positivement corrélé au rendement en grains et à la libération relative d'électrolytes, et négativement associé avec la teneur en chlorophylle, la température du couvert végétale, la hauteur et l'indice de récolte. Les génotypes Bousselam et G3 ont des coordonnées positives avec PC1. Ce qui suggère qu'ils présentent un rendement en grain élevée avec des hauteurs réduits et des teneurs en chlorophylle diminuées. Cependant les génotypes G1, G4, G6, Jupare C 2001, Boutalab, et Bousselam ont des valeurs négatives le long de l'axe 1, ce qui révèle que ces derniers sont moins productifs avec une meilleure expression de la hauteur de la plante et des teneurs en chlorophylle élevés.

Le deuxième axe est positivement associé avec la teneur en chlorophylle, la surface foliaire, la durée de la phase végétative ainsi que le nombre des grains par épis. Tandis que, les paramètres de productivité : poids de mille grains, la biomasse aérienne, et le nombre d'épis sont négativement corrélés à l'axe 2. Les deux lignées G4 et G5 tardives sont bien représentés sur l'axe 2 se distinguent par des teneurs en eau élevés importants, et un nombre d'épis/m² élevés avec un poids de mille grains assez faibles. Bien que la lignée précoce G2 se caractérise par un nombre d'pis faible et une meilleure expression de pois de mille grains.

Tableau 7. Valeurs propres, % de variance cumulée de ACP durant deux saisons.

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	3,6616	2,9886	2,3571	1,8725
Variabilité (%)	28,1661	22,9892	18,1312	14,4041
Cumulative %	28,1661	51,1553	69,2865	83,6906

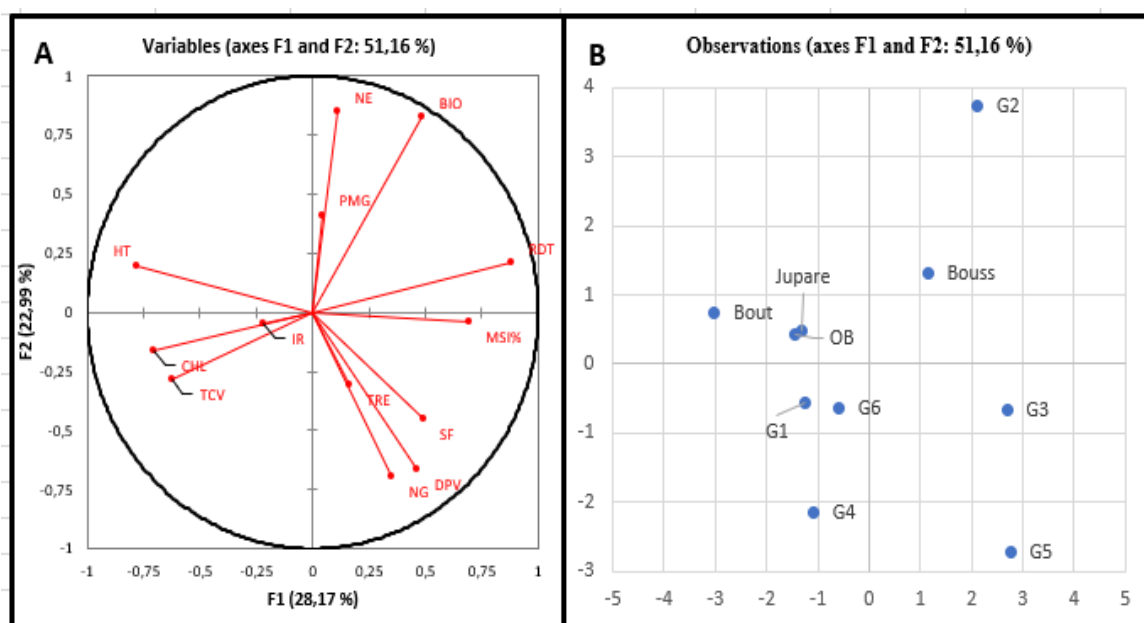


Figure 9. A : Biplot des paramètres mesurés avec deux premiers composants de l'ACP, B : la distribution des génotypes sur le plan, F1, F2 pendant les deux années de culture.

CONCLUSION

La sécheresse est l'un des stress abiotiques les plus importants qui réduisent le rendement cérééalier dans les régions pluviales. Cette étude a permis d'évaluer les différents génotypes de blé dur en fonction de leurs caractéristiques agro-physiologiques. Les résultats obtenus fournissent des informations pour faciliter la sélection et la culture de ces génotypes en conditions semi-arides.

L'analyse de la variance pour les deux saisons montre la présence d'une variabilité au sein des génotypes pour la quasi-totalité des paramètres étudiés. Ainsi, l'effet année était significatif pour la majorité des caractères, ce qui suggère que le comportement des génotypes était influencé par les variations climatiques intersaison. On peut conclure que la saison agricole 2021-2022 était la campagne la plus appropriée pour une meilleure expression de la majorité des paramètres évalués. Nos résultats indiquent que durant la saison 2021-2022, les génotypes G2, G3 et G5 ont enregistré le rendement le plus élevé (respectivement 35,2, 34,8 et 28,9 q.ha⁻¹) avec des teneurs en eau modérées et des valeurs de température faibles, avec

G2 (22 °C), G3 (22,43 °C) et G5 (24,63 °C). Cependant, durant la deuxième année 2022-2023, c'était la lignée G1 qui se détache en tête avec le meilleur rendement. Le résultat des corrélations entre les caractères analysés durant deux saisons a révélé que le rendement en grains montre des associations négatives et significatives avec la hauteur de la plante et la température du couvert végétale et une corrélation positive avec la stabilité membranaire. Cependant, une association non significative a été révélée entre la biomasse aérienne et le nombre d'épis/m².

Chapitre III

Analyse du comportement des géotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) Sous effet d'un stress oxydatif.

Partie 1 : peroxydation lipidique, teneur en proline et sucres solubles comme indicateurs de tolérance au stress oxydatif dans certains génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.)

الملخص

الإجهاد التأكسدي المحفز بواسطة الغليفوسات هو ظاهرة معقدة ينجم عنها اختلال في التوازن بين الأنواع التفاعلية للأكسجين (ERO) ومضادات الأكسدة في خلايا النباتات. تم إجراء هذه الدراسة في المعهد التقني للزراعات الواسعة في سطيف (ITGC) لتقييم استجابة بعض الأنماط الوراثية للقمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) المعرضة للإجهاد التأكسدي الناتج عن مبيد الأعشاب الغليفوسات. في مرحلة الإزهار، تم رش محلول الغليفوسات بتركيز 5 ملي مول على الورقة العلم وتم إجراء الاختبارات المخبرية بعد 48 ساعة من تطبيق الغليفوسات. تم قياس فوق أكسدة الدهون، محتوى البرولين، والسكريات القابلة للذوبان على مستوى مخبر المعهد الوطني الجزائري للبحث الزراعي سطيف. أظهر تحليل التباين وجود اختلافات معنوية جدًا بين العينات الشاهد والمعاملة بالغليفوسات. وبالتالي، فإن الإجهاد التأكسدي الناتج عن الغليفوسات يؤثر بشكل كبير على محتوى المالمونديالدهيد، البرولين، والسكريات القابلة للذوبان في الأنماط الوراثية المختبرة. يعتبر فوق أكسدة الدهون مهما لدى الأنماط G1 و G3، مما يعكس درجة الأضرار التأكسدية في هذه الأخيرة. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي الإجهاد التأكسدي إلى تحفيز إنتاج البرولين والسكريات القابلة للذوبان، حيث تظهر الأنماط الوراثية G3 ، G4 ، G1 ، G5 ، Jupare C 2001 ، واد البارد و بوسلام القيم القصوى، مما يؤكد تكيفًا أفضل لهذه الأنماط الوراثية مع الإجهاد التأكسدي.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد التأكسدي، البرولين، المالمونديالدهيد، السكريات، الغليفوسات.

RESUME

Le stress oxydatif induit par le glyphosate est un phénomène complexe provoqué par un déséquilibre entre les espèces réactives de l'oxygène (ERO) et les antioxydants dans les cellules végétales. La présente étude a été réalisée à l'Institut technique des grandes cultures de Sétif (ITGC-AES) pour évaluer la réponse de certains génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) exposés au stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate. Au stade de l'épiaison, une solution de 5 Mm de glyphosate a été pulvérisée sur les feuilles étendard et les tests ont été réalisés 48 heures après l'application du glyphosate. La peroxydation lipidique, la teneur en proline, et les sucres solubles ont été quantifiées. L'analyse de variance a révélé des différences très hautement significatives entre les deux traitements. Ainsi, le stress oxydatif induit par le glyphosate affecte significativement la teneur en malondialdéhyde, proline, et en sucres solubles chez les génotypes testés. La peroxydation des lipides est importante chez les lignées G1 et G3, ce qui reflète le degré des dommages oxydatifs chez ces derniers. De plus, le stress oxydant déclenche la synthèse de la proline et des sucres solubles, les génotypes G3, G4, G1, G5. Jupare C 2001, Oued el Bared et Bousselam affichent les valeurs maximales, ce qui confirme une meilleure adaptation de ces génotypes au stress oxydant.

Mots clés : stress oxydatif, proline, malondialdéhyde, sucres, glyphosate.

ABSTRACT

Oxidative stress induced by glyphosate is a complex phenomenon caused by an imbalance between reactive oxygen species (ROS) and antioxidants in plant cells. This study was conducted at the Technical Institute of Field Crops in Sétif (ITGC-AES) to evaluate the response of certain durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) exposed to oxidative stress induced by the herbicide glyphosate. At the heading stage, a 5 mM solution of glyphosate was sprayed on the flag leaves, and tests were conducted 48 hours after glyphosate application. Lipid peroxidation, proline content, and soluble sugars were quantified. The analysis of variance revealed highly significant differences between the two treatments. Thus, glyphosate induced oxidative stress significantly affects the malondialdehyde content, proline, and soluble sugars in the tested genotypes. Lipid peroxidation is notable in the G1 and G3 lines, reflecting the extent of oxidative damage in these genotypes. Additionally, oxidative stress triggers the synthesis of proline and soluble sugars, with genotypes G3, G4, G1, G5, Jupare C 2001, Oued el Bared, and Bousselam displaying maximum values, confirming a better adaptation of these genotypes to oxidative stress.

Keywords: oxidative stress, proline, malondialdehyde, sugars, glyphosate.

INTRODUCTION

La culture des céréales est très ancienne en Algérie en raison de son utilisation pour l'alimentation humaine et animale (Ladoui et *al.*, 2020). Parmi les céréales, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est l'une des espèces importantes dans le bassin méditerranéen, cultivée depuis des siècles dans des conditions climatiques très variées (Ben M'Barek et *al.*, 2022). Il est cultivé dans le monde entier sur près de 17 millions d'hectares, avec une production mondiale de 38,1 millions de tonnes en 2019 (Xynias et *al.*, 2020). Le glyphosate (N-(phosphonométhyl)-glycine) est l'une des herbicides les plus utilisées dans l'agriculture moderne en raison de son large spectre de contrôle des mauvaises herbes (Sergiev et *al.*, 2020). Il affecte non seulement les mauvaises herbes, mais aussi les plantes cultivées, entraînant un stress oxydatif et une perturbation de l'homéostasie cellulaire des plantes (Gomes et *al.*, 2014 ; Zhao et *al.*, 2020). Ainsi, il pourrait stimuler le développement des espèces réactives de l'oxygène (ROS), entraînant un stress oxydatif (Spormann et *al.*, 2019). Chaki et *al.* (2020) ont déclaré que des concentrations élevées d'espèces réactives dans les plantes perturbent l'homéostasie redox, ce qui pourrait endommager les lipides membranaires, les protéines et les acides nucléiques. La peroxydation lipidique peut être décrite de manière générale comme un processus sous lequel des oxydants tels que les radicaux libres ou les espèces non radicalaires attaquent des lipides contenant des doubles liaisons carbone-carbone (Ayala et *al.*, 2014). Le degré de peroxydation des lipides est évalué par la teneur en malondialdéhyde. Il s'agit d'un produit final de la peroxydation des lipides, fréquemment utilisé comme indicateur du stress oxydatif car il reflète le degré de la dégradation oxydative des membranes. (Sharma et *al.*, 2016 ; Sporman et *al.*, 2019). De même, Singh et Rathore (2017) ont remarqué que l'accumulation de la teneur en malondialdéhyde dans les plantes de pois révélait une peroxydation lipidique. Les plantes ont développé des mécanismes pour faire face au stress oxydatif causé par l'accumulation d'oxygène réactif (ERO). Ainsi, les plantes accumulent certains osmolytes pour limiter les dommages cellulaires et maintenir les différences osmotiques entre la membrane environnante de la cellule et le cytosol (Sharma et *al.*, 2019). Parmi les osmolytes fréquents qui jouent un rôle important dans l'osmorégulation sont la proline et le sucre. La proline est un acide aminé qui joue un rôle bénéfique chez les plantes exposées à des conditions de stress. En outre, une corrélation positive entre l'accumulation de proline et l'amélioration de la tolérance au stress chez les plantes a été observée (Elewa et *al.*, 2017 ; Hosseinifard et *al.*, 2022). D'après Rajametov et *al.* (2021), la proline protège la cellule des dommages causés par la peroxydation des lipides et détoxifie la membrane due aux espèces réactives de l'oxygène. De plus, plusieurs études ont rapporté que

la proline joue divers rôles dans des conditions de stress qui peut améliorer la stabilité des protéines et protéger l'intégrité de la membrane en se liant aux liaisons hydrogène (Hosseinifard et *al.*, 2022). Similaire à la proline, sucres solubles servir d'osmoprotecteur, aide au maintien de l'homéostasie cellulaire, et désintoxication des espèces réactives de l'oxygène et agit comme une molécule de signalisation dans des conditions stressantes (Chauhan et *al.*, 2022). De plus, les sucres jouent un rôle actif dans la régulation de la photosynthèse, de l'osmose, de l'homéostasie et de la stabilisation membranaire. La présente étude visait à déterminer la tolérance au stress oxydant chez dix génotypes de blé dur en évaluant le degré de peroxydation lipidique, la teneur en proline et l'accumulation des sucres solubles.

MATERIALS ET METHODES

1- Matériel végétal et conditions de culture

Cette étude a été réalisée au cours de deux campagnes agricoles, 2021-2022 et 2022-2023, à la station expérimentale agricole de Sétif (Algérie) (ITGC-AES, 36° 12' N et 05° 24' E, à 1 081 m d'altitude). Le matériel végétal utilisé, le dispositif expérimental ainsi que les conditions de culture sont décrits précédemment (Chapitre II). Au stade de l'épiaison, dans chaque parcelle, quatre feuilles de chaque génotype ont été pulvérisées avec une solution de glyphosate à 5 mM. Toutes les mesures ont été effectuées 48 heures après le traitement.

Le glyphosate est un herbicide non sélectif et systémique largement utilisé pour éliminer les mauvaises herbes. Il agit en inhibant l'enzyme EPSPS, essentielle à la biosynthèse des acides aminés aromatiques chez les plantes, entraînant ainsi leur mort. En outre, il peut provoquer un stress oxydatif en perturbant l'équilibre entre la production des espèces réactives d'oxygène (ERO) et le système antioxydant des plantes.

Les paramètres évalués

2-1 La peroxydation des lipides

Les dommages oxydatifs aux lipides membranaires ont été évalués par quantification de la teneur en malondialdéhyde (MDA) dans un échantillon de feuille. Des échantillons de feuilles de 200 mg ont été broyés en poudre fine dans l'azote liquide à l'aide d'un mortier et d'un pilon, puis homogénéisés avec 3 ml d'un tampon de phosphate de potassium à 50 mM (pH 7,5). Un volume équivalent d'acide thiobarbiturique (TBA, 0,5 %) a été ajouté. L'homogénat a ensuite été incubé dans un bain-marie à 95°C pendant 30 minutes. Après centrifugation à $3\,000 \times g$

pendant 10 minutes, l'absorbance de l'échantillon a été lue au spectrophotomètre à 532 nm, puis à 600 nm (Zhang et al., 2013). La teneur en MDA a été calculée comme décrit par Bao et al. (2009) : $[MDA] (nmol.g^{-1}MF) = [(Abs532 - Abs600) \times V_t / \epsilon \times MF] \times 100$

ϵ : coefficient d'extinction = 155 mM⁻¹cm⁻¹

MF : Matière végétale fraîche (g)

V_t : volume de l'extrait (ml)

2-2 Teneur en proline

La teneur en proline dans les feuilles a été quantifiée selon la méthode de Monneveux et Nemmar (1986). La proline est extraite à 85 °C avec du méthanol et colorée à la ninhydrine en présence d'acide acétique, d'acide orthophosphorique et de toluène. La mesure de la couleur rouge obtenue est réalisée sur un spectrophotomètre à 528 nm. La courbe d'étalonnage est établie en utilisant des concentrations croissantes de proline préparées à partir d'une solution mère de 20 µg/ml. La conversion des densités optiques (DO) en concentrations en µg/ml a été effectuée en appliquant l'équation : $DO = 0,0496 \times C - 0,1386$ (avec $R^2 = 0,9904$).

2-3 Les sucres solubles

Les sucres solubles ont été quantifiés via le réactif à l'anthrone selon la méthode de Staub (1963). Des échantillons de matière fraîche de 100 mg ont été découpés en morceaux et placés dans des tubes à essai remplis aux deux tiers d'éthanol à 80 %. Après une macération de 48 heures, les solutions ont été versées dans des boîtes de Pétri en verre et placées dans une étuve à 38°C pendant 48 heures pour évaporer l'alcool. Ensuite, 20 ml d'eau distillée ont été ajoutés à chaque boîte pour dissoudre les extraits. Dans un second jeu de tubes à essai, 2 ml de l'extrait végétal ont été mélangés à 4 ml de la solution à l'anthrone. Après agitation, les tubes ont été placés dans un bain-marie à 90°C pendant 8 minutes, puis refroidis pendant 30 minutes à l'obscurité. La densité optique des solutions a été mesurée à une longueur d'onde de 585 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Une courbe d'étalonnage a été utilisée pour déterminer la quantité de sucre présente dans les échantillons, en utilisant des concentrations croissantes de glucose préparées à partir d'une solution mère de 50 µg/mL.

RESULTAT ET DISCUSSION

1- L'évaluation de la peroxydation lipidique chez les géotypes testés

Les résultats présentés dans le tableau 9 montrent que la teneur en MDA dans les conditions normales varie de 7,85 nmol·g⁻¹ MF pour la variété Jupare C 2001 à 16,86 nmol·g⁻¹ MF pour G1, avec une moyenne globale de 11,33. Une augmentation significative des niveaux de la teneur en MDA a été observée après le traitement au glyphosate pour les deux saisons de la culture. Au cours des deux campagnes, l'accumulation maximale de MDA a été observée chez la lignée G1 (72,47 nmol. g⁻¹ MF), suivie par la lignée G3 (62,83 nmol. g⁻¹ MF). Cependant, nous avons constaté une faible accumulation de la teneur en MDA chez les géotypes Jupare C 2001, Boutaleb et Oued el bared avec 21,43, 28,82 et 28,13 nmol. g⁻¹ MF, respectivement et avec une moyenne générale de 66,92 nmol.g⁻¹ MF. Les deux lignées G1 et G3 présentent un écart positif élevé de teneur de MDA au-dessus de la moyenne (figure 10), indiquent une forte dégradation des lipides dans la membrane cellulaire, qui est un indicateur d'un stress oxydatif sévère. Alors que, les géotypes présentant un écart négatif montrent des faibles dommages oxydatifs et des membranes cellulaires stables. En effet, la teneur de malondialdéhyde (MDA) est un produit de la peroxydation lipidique ; il est fréquemment utilisé comme biomarqueur du stress oxydatif (Morales and Munné-Bosch, 2019). L'augmentation significative de la teneur en MDA indique un fort déséquilibre de la peroxydation lipidique de la membrane des plantes traitées à l'herbicide (Shopova et al., 2021). De plus, Gomes et al. (2017) ont déclaré que le stress oxydatif provoqué par les herbicides augmente la concentration de malondialdéhyde chez les plantes. Cependant Shopova et al. (2021) ont observé que le glyphosate provoquait des altérations indésirables typiques de la croissance du blé ; la croissance des plantes supprimée par le glyphosate est une conséquence de l'accumulation de ROS, qui induisent une dégradation des biomembranes cellulaires, comme en témoigne la quantité accrue de MDA. De plus, la peroxydation lipidique aurait pu endommager le chloroplaste en inhibant la synthèse de la chlorophylle et donc la photosynthèse (Langaro et al., 2020).

L'analyse de la variance au seuil 5 % montre une différence très hautement significative entre les deux traitements étudiés ainsi que pour l'interaction géotype x traitement. Le test LSD au seuil 5% montre deux groupes homogènes (tableau 8). Le traitement stress oxydant se détache en tête où l'accumulation de MDA est importante avec une moyenne de 38,82 nmol. g⁻¹ MF. Bien que le traitement conditions normales montre être en groupe (b) où l'ensemble des

génotypes accumulent des faibles teneurs en MDA avec 11,33 nmol. g⁻¹ MF. Conformément à nos résultats, plusieurs auteurs ont également constaté une augmentation de la teneur en MDA après le traitement au glyphosate dans l'orge (Spormann et *al.*, 2019), la tomate (Soares et *al.*, 2019) et le pois (Sergiev et *al.*, 2020). De même, Bouchemal et *al.* (2016) ont révélé que le stress oxydatif induit par l'herbicide Paraquat augmente le niveau de peroxydation lipidique dans les génotypes du blé dur. La peroxydation des lipides membranaire est souvent utilisée comme un outil pour déterminer le degré de sensibilité des plantes aux dommages oxydatifs. Selon Tulkova et Kabashnikova (2021) la peroxydation lipidique fait référence à une série de réactions radicalaires libres dans les acides gras insaturés et qu'une augmentation de l'activité de peroxydation lipidique sous un stress prolongé indique une diminution de la capacité de récupération au sein des cellules végétales. De plus, les produits de peroxydation lipidique induisent une perte d'intégrité membranaire qui conduit finalement à une cytotoxicité sans fioritures et pourrait entraîner une croissance cellulaire effrénée ou même une apoptose.

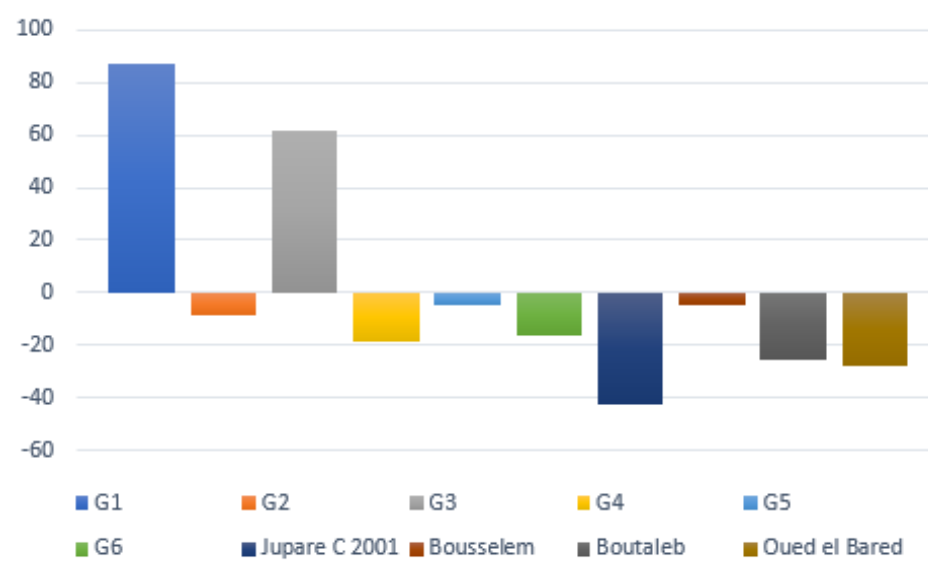


Figure 10. Écart par rapport aux valeurs moyennes du malondialdéhyde sous stress oxydatif dans les génotypes testés au cours des deux campagnes 2021-2022 et 2022-2023.

2- La teneur en proline

L'analyse de la variance montre une différence non significative entre les génotypes testés. Par contre, l'effet traitement ainsi que l'interaction génotype X traitement est très hautement significative (tableau 8). La proline est une molécule importante dans la résistance au stress oxydatif (Kishor et *al.*, 2022). Ainsi, il joue un rôle dans les dommages oxydatifs grâce à sa capacité à éliminer les ROS de la cellule ou à activer un mécanisme de défense antioxydant

(Langaro et *al.*, 2020). Dans notre étude, sous conditions normales la teneur en proline s'étale de 5,32 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ MF pour G1 à 14,70 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ pour la lignée G4 et une moyenne générale de 9,47 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ MF. Nous avons observé une augmentation non significative de la teneur en proline chez les feuilles traitées par le glyphosate, la teneur en proline variée de 32,66 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW chez la lignée G2 à 48,14 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW pour la lignée G4 avec une moyenne globale de 40,59 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW (Tableau 9). Ces résultats corroborent avec les résultats de Sergiev et *al.* (2020) ont rapporté que les dommages oxydatifs provoqués par l'application de glyphosate augmentent considérablement la teneur en proline chez les plants de pois. Des résultats ont été observés chez le blé (Shopova et *al.*, 2021).

La comparaison des traitements au seuil de 5 %, montre deux groupes homogènes, Le groupe (a) correspond au traitement stress oxydant avec une accumulation importante de la teneur en proline avec 40,59 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ MF bien que le groupe (b) coïncide au traitement des conditions normales où la proline s'accumule en faible quantité avec 9,47 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ MF. Ces résultats confirment que la proline s'accumule dans les tissus végétaux comme une réponse adaptative au stress oxydant. Les génotypes Bousselam, Jupare C 2001, Oued el Bared, G4 et G3 montrant un écart positif élevé par rapport à la moyenne, qui sont considérés comme les plus tolérants au stress oxydatif (Figure 11). De plus, Gomes et *al.* (2017) suggèrent que des concentrations accrues des espèces réactives d'oxygènes stimulent généralement la biosynthèse de la proline, La proline peut également agir comme médiateur de l'ajustement osmotique et de la protection de la membrane plasmique en tant que source de carbone et d'azote (Hemaprabha et *al.*, 2013). De nombreuses études ont soutenu l'idée selon laquelle la proline joue plusieurs rôles lors du stress oxydatif, notamment en améliorant la photosynthèse et en interagissant avec plusieurs molécules de signalisation, telles que l'oxyde nitrique et les phytohormones, pour activer les molécules de signalisation du stress (Hanif et *al.*, 2021 ; Rajametov et *al.*, 2021).

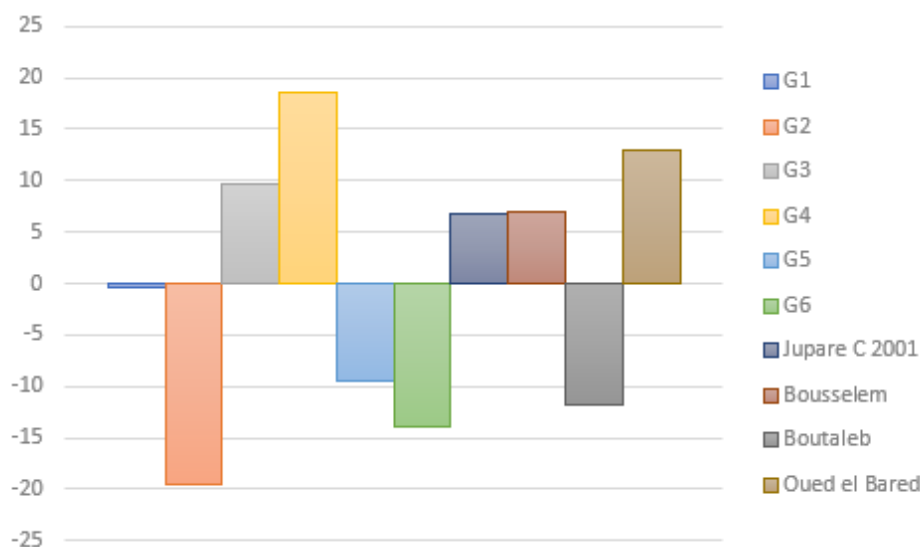


Figure 11. Écart par rapport aux valeurs moyennes de la teneur en proline sous stress oxydatif dans les génotypes testés au cours des deux saison 2021-2022 et 2022-2023.

3- Les sucres solubles

Les sucres solubles agissent comme des molécules de signalisation nutritives, osmoprotectrices et métabolites et sont impliqués dans diverses réponses au stress abiotique. Selon les résultats illustrés dans le tableau 9, la teneur en sucres solubles sous conditions normales est variée de 31,78 ug. g⁻¹ pour la variété oued el Bared à 80,70 ug. g⁻¹ pour G5 avec une moyennes générale de 61,98 ug. g⁻¹. Un accroissement de la teneur en sucres solubles a été remarqué au niveau des feuilles pulvérisées avec du glyphosate. La teneur des sucres solubles variée de 93, 61 ug. g⁻¹ pour la variété Oued el Bared à 179,93 ug.g⁻¹ pour la lignée G5, avec une moyenne globale de 131,45 (Tableau 9). Selon Sharma et *al.* (2019) les sucres solubles sont des osmolytes importants, qui limitent les dommages cellulaires dus au stress oxydatif. Cependant, les niveaux des sucres peuvent également s'accumuler en raison de la dégradation de l'amidon dans des conditions de stress. Nos résultats sont en accord avec ceux de Fernández-Escalada et *al.* (2019), qui ont montré que les sucres solubles s'accumulent dans L'amarante de Palmer traitée au glyphosate.

L'analyse de la variance révèle un effet de traitement très hautement significatif. Tandis qu'il n'existe aucune différence significative pour l'effet génotype ainsi que pour l'interaction génotype-traitement. Le test LSD (5 %) a regroupé les traitements en deux groupes homogènes (Tableau 8). Le groupe (a) rassemble le traitement de stress oxydant où les génotypes testés présentent une forte accumulation des sucres solubles, soit 131.44 ug. g⁻¹. Par contre, le traitement sous conditions normales est classé dans le groupe (b) avec une faible

CHAPITRE III ANALYSE DU COMPORTEMENT DES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) SOUS EFFET D'UN STRESS OXYDATIF.

accumulation des sucres, soit 61,97 ug. g⁻¹. L'accumulation de sucre soluble chez les plantes est généralement considérée comme une réponse adaptative à la condition de stress. Ainsi, Les sucres solubles jouent un rôle majeur dans le maintien de l'homéostasie osmotique ainsi que dans l'élimination des espèces réactive d'oxygène (Sharma *et al.*, 2019).

Selon la figure 12, les deux lignées G1 et G5 ont réagi à ces conditions en augmentant la quantité totale de sucres dans leurs cellules, ce qui est un bon indicateur de l'adaptation de ces génotypes aux dommages oxydatifs. De plus, L'accumulation des espèces réactives d'oxygènes est directement corrélée à l'accumulation de sucre pour s'adapter aux effets néfastes du stress oxydatif. De plus, l'accumulation de sucre empêche l'oxydation des membranes cellulaires en cas de carence en eau, maintient la turgescence des feuilles et empêche la déshydratation des membranes et des protéines (Sami *et al.*, 2016).

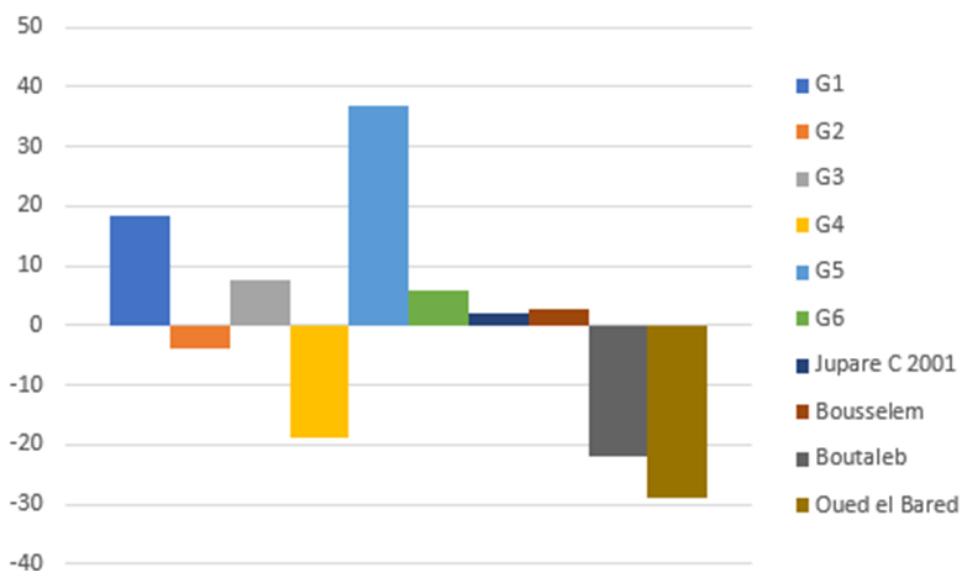


Figure 12. Écart par rapport aux valeur moyenne de la teneur en sucres solubles sous stress oxydatif chez les génotypes durant les deux saisons 2021-2022 et 2022-2023.

Tableau 8. Carrés moyens de l'analyse de la variance pour deux années des variables mesurées.

Source de variation	df	MDA	Proline	Sucre
Génotype	9	948,92***	41,59 ^{ns}	1938,827 ^{ns}
Traitement	1	22675,774***	14528,332***	72393,441***
Génotype x traitement	9	634,157***	58,746*	811,592 ^{ns}
Effet traitement				
Conditions Normal		11,33 ^b	9,47 ^b	61,97 ^b
Condition stress oxydant		38,82 ^a	40,59 ^a	131,44 ^a

CHAPITRE III ANALYSE DU COMPORTEMENT DES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) SOUS EFFET D'UN STRESS OXYDATIF.

Tableau 9. Variations de la teneur en malondialdéhyde, proline, et les sucres solubles des génotypes testés.

Génotypes	Condition normales			Condition de stress oxydant		
	MDA	Proline	Sucre	MDA	Proline	Sucre
G1	16,86 ^a	5,32 ^c	63,89 ^{ab}	72,47 ^a	40,46 ^{abcd}	155,45 ^a
G2	11,03 ^b	10,71 ^b	78,46 ^a	35,4 ^{bc}	32,66 ^d	126,47 ^a
G3	11,42 ^b	10,21 ^b	74,62 ^a	62,83 ^a	44,53 ^{abc}	141,54 ^a
G4	8,65 ^b	14,70 ^a	41,78 ^{bc}	31,71 ^{bc}	48,14 ^a	106,72 ^a
G5	15,64 ^a	8,46 ^{bc}	80,70 ^a	37,10 ^b	36,76 ^{bcd}	179,93 ^a
G6	11,37 ^b	8,79 ^{bc}	63,30 ^{ab}	32,45 ^{bc}	34,92 ^{cd}	138,97 ^a
Jupare C 2001	7,85 ^b	10 ^b	56,50 ^{abc}	22,43 ^c	43,31 ^{abc}	134,35 ^a
Boussalam	9,60 ^b	10,31 ^b	71,15 ^a	36,91 ^b	43,41 ^{abc}	134,90 ^a
Boutaleb	10,56 ^b	7,87 ^{bc}	57,58 ^{abc}	28,82 ^{bc}	35,84 ^{bcd}	102,51 ^a
Oued el bared	10,35 ^b	8,34 ^{bc}	31,78 ^c	28,13 ^{bc}	45,86 ^{ab}	93,61 ^a
Moyenne	11,33	9,47	61,98	66,92	40,59	131,45
Max	16,86	14,70	80,70	72,47	48,14	179,93
Min	7,85	5,32	31,78	22,43	32,66	93,61
LSD	3,88	3,85	28,20	23,45	10,30	90,0

CONCLUSION

Nous résultats montrent clairement la différence entre les deux traitements ainsi que l'herbicide glyphosate induit un stress oxydant chez les génotypes de blé dur ce qui a été manifeste par l'augmentation de la teneur en MDA, l'accumulation de la proline et les sucres solubles. Le test de peroxydation lipidique a révélé que les deux lignées G1 et G3 sont enregistré la teneur en MDA la plus élevée ce qui confirme que ces derniers sont plus sensibles aux lésions oxydatives et subi une forte altération des lipides membranaire. Bien que, le génotypes Jupare C 2001 est le moins affectés par les oxydatifs. Cependant, le matériel végétal évaluée répondent significativement au stress oxydant induit par l'herbicide glyphosate en accumulant les osmolytes protectrice : les sucres solubles et la proline dans leurs cellules. Une forte accumulation de la proline a été observé chez les génotypes G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared et Boussalam. Concernant les sucres solubles les valeurs maximales ont été observé chez deux les lignées G1 et G5, ce qui reflètent qu'ils présentent les meilleures adaptations au stress oxydant déclenché par le glyphosate.

Partie 2 : Évaluation de la teneur en chlorophylle et de la stabilité de la membrane sous stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate chez certains génotypes de blé dur (*Triticum durum* desf.) : étude in vitro

المخلص

الإجهاد التأكسدي الناتج عن الغليفوسات هو ظاهرة كيميائية وفيزيولوجية معقدة تتطور نتيجة لإنتاج مفرط وتراكم بعض الأنواع التفاعلية للأكسجين. أجريت هذه الدراسة في المختبر التابع للمعهد الوطني للبحوث الزراعية في الجزائر (INRAA) سطيف، لاختيار الأنماط الوراثية للقمح الصلب (*Triticum durum* L.) الأكثر حساسية للإجهاد التأكسدي الناتج عن مبيد الأعشاب الغليفوسات، من خلال تقييم تحطم محتوى الكلوروفيل وتسرب الإلكتروليتات. أظهرت الأنماط الوراثية اختلافات معنوية كبيرة تقريباً في جميع المؤشرات المدروسة. تراوحت نسبة تحطم الكلوروفيل تحت تأثير الإجهاد التأكسدي المحفز بالغليفوسات ما بين 26,42 % للنمط الوراثي G5 و 48,75 % للصنف المحلي بو طالب، وكانت قيم مؤشر الحساسية للغليفوسات تتراوح بين 0.65 و 1.2، مما يعكس اختلافات ملحوظة في استجابة الأنماط الجينية المعرضة لهذا المبيد. ظهر النمط G5 كالأكثر تحملاً للإجهاد التأكسدي مع أدنى نسبة لتحطم الكلوروفيل وأدنى مؤشر حساسية للغليفوسات. علاوة على ذلك، كان تسرب الإلكتروليت النسبي كبيراً في النمط الوراثي G 4 (80,16%)، بينما سجل النمط G6 أقل قيمة (50,77%). بناءً على ذلك، يبدو أن الـ G5 و G6 هما الأكثر تأقلم و تكيف مع تأثيرات الإجهاد التأكسدي.

الكلمات المفتاحية: الكلوروفيل، التدهور، الحساسية، التكيف، الغليفوسات

RESUME

Le stress oxydatif induit par le glyphosate est un phénomène chimique et physiologique complexe et se développe à la suite d'une surproduction et d'une accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Cette étude a été menée in vitro à l'institut National de Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) Sétif, pour sélectionner le blé dur (*Triticum durum* L.) les plus sensible au stress oxydant induit par l'herbicide en évaluant la dégradation de la teneur en chlorophylle et la fuites des électrolytes. Les génotypes ont montré des variations significatives presque pour tous les caractères étudiés. Le taux de perte de chlorophylle variait de 26,42 % pour le génotype G5 à 48,75 % pour la variété locale Boutaleb, Les valeurs de l'indice de sensibilité au glyphosate se situaient entre 0,65 et 1,2, reflétant des différences notables dans la réponse des génotypes exposées à cet herbicide. La lignée G5 apparue comme la plus tolérante au stress oxydatif avec un taux de perte de chlorophylle le plus bas et indice de sensibilité au glyphosate le plus bas. De plus, la libération relative d'électrolyte été importante chez la lignée G4 (80,16 %) tandis que, la ligné G6 a montré la valeur la plus faible (50,77 %). Par conséquent, les deux lignées G5 et G6 semblent les plus adaptées aux conditions de culture.

Mots clés : chlorophylle, dégradation, sensible, adapté, glyphosate.

ABSTRACT

Oxidative stress induced by glyphosate is a complex chemical and physiological phenomenon, arising from an overproduction and accumulation of reactive oxygen species (ROS). This study was conducted in vitro at the National Institute of Agronomic Research of Algeria (INRAA) Setif, to select the most sensitive durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes to oxidative stress induced by the herbicide. Sensitivity was evaluated by measuring chlorophyll content degradation and electrolyte leakage. The genotypes showed significant variation in nearly all traits studied. Chlorophyll loss ranged from 26.42% for genotype G5 to 48.75% for the local variety Boutaleb. Glyphosate sensitivity index values ranged from 0.65 to 1.2, reflecting notable differences in genotype responses to herbicide exposure. The G5 line appeared the most tolerant to oxidative stress, with the lowest chlorophyll loss rate and the lowest glyphosate sensitivity index. Additionally, relative electrolyte leakage was high in the G4 line (80.16%), while line G6 showed the lowest value (50.77%). Therefore, both lines G5 and G6 appear to be the most adapted to cultivation conditions.

Keywords : chlorophyll, degradation, sensitivity, adaptation, glyphosate.

INTRODUCTION

Au cours des 50 dernières années, l'augmentation de la population mondiale et les préférences de consommation variées ont conduit à une demande accrue de produits à base de blé dans le monde, sachant également que le blé est un aliment de base pour plus de 35 % de la population mondiale (FAO, 2020). Le blé dur subit souvent des conditions de stress liées à la sécheresse au cours du cycle de culture. Ainsi, l'amélioration du la tolérant à la sécheresse est un objectif majeur des programmes de sélection végétale pour les régions arides et semi-arides (Thakur et *al.*, 2022). Le glyphosate (N-[phosphonométhyl]-glycine) est l'herbicide non sélectif le plus couramment utilisé dans le monde, depuis sa commercialisation par Monsanto dans les années 1970 (Soares et *al.*, 2019). Le glyphosate affecte les mécanismes physiologiques des plantes tels que la photosynthèse, la nutrition minérale et les événements oxydatifs (Singh et *al.*, 2020 ; Rivas-Garcia et *al.*, 2022). Parallèlement à l'inhibition de sites cibles spécifiques, l'action du glyphosate entraîne également un stress oxydatif chez les plantes, qui est très probablement un effet secondaire de la voie bloquée du shikimate (Gomes et *al.*, 2014 ; Freitas-Silva et *al.*, 2017). Un stress oxydant a été observé chez des plantes exposées au glyphosate en raison de l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ERO). De plus, l'augmentation de la production de ROS peut nuire aux processus photosynthétiques, c'est-à-dire en diminuant la quantité de chlorophylle et l'efficacité photochimique, ce qui réduit la croissance des plantes. En effet, plusieurs études ont montré que les plantes exposées à l'application de glyphosate ont une teneur en chlorophylle plus faible. Ces résultats ont été attribués soit à une dégradation accrue de la chlorophylle, soit à une diminution de la synthèse de la chlorophylle (Gomes et *al.*, 2017 ; Ibrahim et *al.*, 2022). La diminution de la teneur en chlorophylle pourrait être expliqué par les dommages directs sur le chloroplaste, et par la dégradation ou perturbations de la biosynthèse de la chlorophylle (Yannicari et *al.*, 2012). De plus, Gomes et *al.* (2017) mentionnent que la diminution de la teneur en chlorophylle en présence de l'herbicide glyphosate peut être responsable d'une moindre interception de la lumière et d'un taux de transport d'électrons plus faible. D'autre part, les espèces réactives d'oxygènes (ERO) peuvent briser la membrane lipidique et augmenter la fluidité et la perméabilité de la membrane (Sharifi-Rad et *al.*, 2020). Le but de cette étude est d'évaluer le comportement de certains génotypes de blé dur sous l'effet d'un stress oxydatif induit par le glyphosate, en se basant sur l'estimation de la dégradation de la teneur en chlorophylle et la stabilité membranaire afin de sélectionner les génotypes les plus adaptées à ces conditions.

MATERIELS ET METHODES

1- Materials végétale et l'application de stress oxydant

Le matériel génétique utilisé est déjà présenté (Tableau 1, Chapitre II). Au stade d'épiaison, trois feuilles étendards de chaque génotype ont été coupées et trempées dans 10 ml de solution de glyphosate à 5 mM (dissoute dans de l'eau distillée).

La teneur en chlorophylle (CHL de chaque feuille étandard a été mesurée quotidiennement à l'aide d'un compteur de chlorophylle numérique (CCM) avec les unités (cci) ; cet appareil permet de mesurer l'absorbance de la lumière dans la feuille. L'indice de sensibilité au glyphosate (ISG) a été calculé pour déterminer la sensibilité des génotypes à l'herbicide glyphosate induit un stress oxydatif par la formule suivante :

$$\text{ISG} = \text{perte de chlorophylle pour chaque génotype/moyenne.}$$

La libération relative d'électrolytes des feuilles a été mesurées selon la méthode développée par Baji et *al.* (2001) avec des petites modifications dans le but d'évaluer effet direct du stress oxydant induit par le glyphosate sur la stabilité membranaire des cellules végétale : deux feuilles ont été collectées au hasard pour chaque génotype, lavées à l'eau du robinet puis à l'eau distillée et coupées en segments de 1 cm de longueur. Les segments ont été placés dans des tubes contenant 10 ml d'eau distillé et incubés pendant 24 h à la température ambiante du laboratoire. Ensuite, la première lecture (EC1) a été réalisée. La conductivité finale (EC2) a été mesurée après avoir ajouté 0,02 ml de glyphosate pur dans chaque tube. La libération relative d'électrolytes (REL%) a été calculée comme suit : **REL (%) = (EC1/EC2) × 100.**

RESULTATS ET DISCUSSION

1- La dégradation de la teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle de la feuille avant et après 6 jours de traitement avec l'herbicide glyphosate est illustrée dans le tableau 10, l'analyse de la variance montre que l'effet génotype est très hautement significatif pour tous les paramètres évalués. Les valeurs de la teneur en chlorophylle avant le traitement variaient de 31,85 cci pour le génotype G5 à 53,7 cci pour le génotype introduit Jupare C 2001 avec une moyenne générale de 45,76 cci. Tandis qu'après l'application de glyphosate pendant six jours, la teneur en chlorophylle a diminué et les valeurs ont varié entre 4,35 et 14,32 cci, la valeur la plus élevée a été enregistré chez la lignée G1 (14,32) alors que la variété Boutaleb (4,35) a enregistré la valeur la plus faible. La dégradation de la teneur en chlorophylle est corrélée avec le nombre de jours après l'application du glyphosate (Figure 13). Ces résultats corroborent avec ceux de Zobiole *al.*

(2012) trouvent que la quantité de chlorophylle diminue avec l'augmentation de la concentration du glyphosate. Ahasan et *al.* (2008) à remarquer que l'utilisation de l'herbicide glyphosate provoque un stress oxydatif chez les plantes. De plus, Malalgoda et *al.* (2020) rapporté que l'herbicide glyphosate pourrait réduire la synthèse de la teneur en chlorophylle, ce qui pourrait conduire à une moindre accumulation d'amidon. Une réduction significative du rendement pourrait être due à la réduction des taux de photosynthèse nette, de fermeture des stomates et des dommages oxydatifs du chloroplaste (Bali et Sidhu, 2019).

Les pertes de chlorophylle dues au stress oxydatif induit par le glyphosate et sa vitesse sont présentées dans le tableau 10. Le taux de perte de chlorophylle a été utilisé pour détecter les différences génotypiques en réponse à le stress oxydant. La variété locale Boutaleb a montré le taux de perte le plus élevé (48,75 %), et la valeur la plus élevée de vitesse de dégradation de la chlorophylle (9,23). Bien que, le taux le plus faible est enregistré chez la ligné G5 (26,42 %), avec une faible vitesse de dégradation (4,64). Gomez et *al.* (2017) ont étudié la réponse du saule au stress oxydatif induit par plusieurs concentrations de glyphosate et ont constaté que la réduction de la concentration en chlorophylle pourrait être due à sa dégradation par l'augmentation de la teneur en espèces réactive d'oxygènes. La perte de chlorophylle s'accompagnait de dommages aux chloroplastes du mésophylle, ce qui entraînait un taux de photosynthèse plus faible (Khalilzadeh et *al.*, 2016). En effet, cette diminution de chlorophylle être due à des dommages directs au chloroplaste en présence du glyphosate, car les plantes de tous les groupes exposés à une application unique ou séquentielle de glyphosate avaient généralement des concentrations de chlorophylle inférieures à celles des plantes non exposées à cet herbicide. Il est également bien connu qu'une diminution de la teneur en chlorophylle pourrait être due à une diminution de l'ouverture des stomates, visant à limiter les pertes d'eau par évaporation et à une résistance accrue à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse (Zhu et *al.*, 2016 ; Enneb et *al.*, 2020). Selon Karabulut et Çanakcı (2021) le stress oxydatif créé par le traitement au glyphosate entraînait une diminution de la chlorophylle (a) et (b). De même, Caglar et *al.* (2011) ont analysé les effets d'un herbicide paraquat sur la teneur en chlorophylle, observant que les variétés de blé tendre diminuaient leur teneur en chlorophylle après l'application de paraquat.

L'indice de sensibilité au glyphosate pour les génotypes examinés variait entre 0,68 et 1,21 % avec une moyenne générale de 1 %. La variété Boutaleb a été observée comme la plus sensible au stress oxydatif avec une valeur de 1,21 %, suivie par Jupare C 2001 avec 1,15 ensuite la ligné G6 avec 1,06 %. En fait, la résistance des plantes au stress oxydant est l'un des aspects les plus important de la capacité des plantes à s'adapter à plusieurs stress

CHAPITRE III ANALYSE DU COMPORTEMENT DES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) SOUS EFFET D'UN STRESS OXYDATIF.

environnementaux. De ce fait, Les plantes ont développé divers mécanismes pour faire face au stress oxydatif, notamment la production d'antioxydants et l'activation de voies de réponse au stress (Mishra et *al.*, 2023).

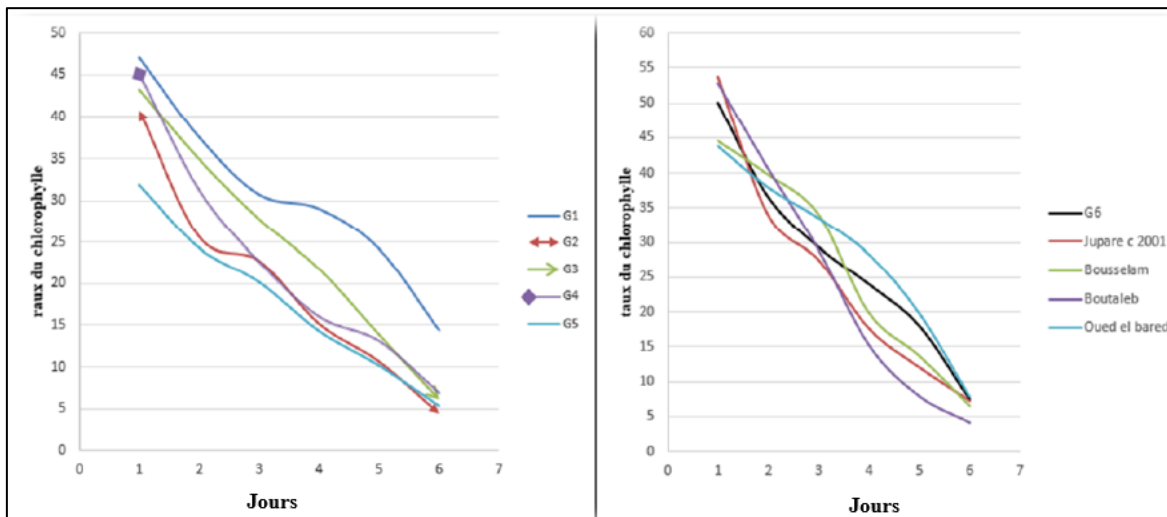


Figure 13. La dégradation de la teneur en chlorophylle des génotypes de blé dur après application de glyphosate.

Tableau 10. Teneur en chlorophylle de la feuille avant et après l'application de glyphosate, perte de chlorophylle (%), indice de sensibilité au glyphosate et vitesse de dégradation de la chlorophylle chez les génotypes testés.

Génotypes	Chl avant application du glyphosate	Chl après application du glyphosate (6 jours après)	Perte de chlorophylle (%)	Vitesse de dégradation de la chlorophylle	Indice de sensibilité au glyphosate (ISG)
G1	51,67 ^{bc}	14,32 ^a	37,35 ^{de}	6,16 ^e	0,93 ^{de}
G2	40,8 ^e	4,35 ^{fg}	36,45 ^{de}	6,44 ^{de}	0,9 ^{de}
G3	43,27 ^d	6,02 ^{de}	37,25 ^{de}	6,41 ^{de}	0,96
G4	44,97 ^d	6,82 ^{bcd}	38,15 ^d	6,79 ^d	0,95 ^d
G5	31,85 ^f	5,42 ^{ef}	26,42 ^f	4,64 ^g	0,65 ^f
G6	50,02 ^c	7,47 ^{bc}	42,55 ^c	7,35 ^c	1,06 ^C
Jupare c 2001	53,7 ^a	7,2 ^{bcd}	46,5 ^b	8,65 ^b	1,15 ^b
Bousselem	44,62 ^d	6,6 ^{cde}	38,02 ^d	6,64 ^d	0,94 ^d
Boutaleb	52,87 ^{ab}	4,12 ^g	48,75 ^a	9,23 ^a	1,21 ^a
Oued el Bared	43,87 ^d	7,9 ^b	35,97 ^e	5,59 ^f	0,89 ^e
Moyennee	45,76	7,02	40,11	6,79	1
Min	31,85	4,12	26,42	4,64	0,68
Max	53,7	14,32	48,75	9,23	1,25
LSD (5%)	1,95	1,25	1,85	0,48	0,04
CV	2,95	12,4	3,32	4,96	3,32
Effet génotype	***	***	***	***	***

*** significative (P < 0.01).

2- La libération relative d'électrolytes

Les membranes végétales sont sujettes à des changements souvent associés à une augmentation de la perméabilité et à une perte d'intégrité sous l'effet de stress environnementaux. Ainsi que, la capacité des membranes cellulaires à contrôler la vitesse de mouvement des ions entrant et sortant des cellules est utilisée comme test des dommages de tissus sur un large éventail (Masoumi et *al.*, 2010). Selon Slama et *al.* (2018) l'évaluation du degré de dommages cellulaires a été réalisée pour les dix génotypes à l'aide de l'indice de stabilité de la membrane : la fuite d'électrolytes a été recommandée comme critère utile pour la sélection de cultivars tolérants au stress chez plusieurs espèces. De plus, la fuite d'ions ont été utilisées comme mesure efficace pour évaluer les dommages induits par les herbicides qui affectent l'intégrité des membranes (Silva et *al.*, 2016). Dans notre étude il existe une différence significative entre les génotypes testé avec une moyenne globale de 64,8 % (Tableau 11). La lignée G6 présentait la valeur la plus faible, ce qui implique que ce génotype présente une meilleure adaptation au stress oxydatif ainsi que la membrane plasmique de ce génotype subit moins de dommages. Bien que, la fuite des électrolytes soit plus élevée chez la lignée G4, ce qui indique que ce dernier est plus sensible aux conditions de stress oxydant et ne possède pas la capacité de retenir un statut antioxydant dans ces conditions. Le glyphosate a provoqué des dommages oxydatifs chez les plantes et perturbé leur homéostasie cellulaire. Sakya et *al.* (2018) signalent que sous conditions de stress oxydant, la production des espèces réactives d'oxygène a augmenté, oxydant ainsi les lipides des membranes et augmentant leur perméabilité, ce qui conduit à une fuite d'ions. De plus, nos résultats corroborent avec ceux de Bouchemal (2016) qui a montré que le traitement des feuilles de blé dur avec un herbicide paraquat peut induire une peroxydation lipidique entraînant une fluidité membranaire et par conséquent une augmentation de la libération d'électrolytes cellulaires.

CHAPITRE III ANALYSE DU COMPORTEMENT DES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) SOUS EFFET D'UN STRESS OXYDATIF.

Tableau 11. La fuite relative d'électrolytes (%) de dix génotypes de blé dur soumis à un stress oxydatif

Génotypes	REL%
G1	61.86 ^{bcd}
G2	64.29 ^{bc}
G3	66.67 ^{bc}
G4	80.16 ^a
G5	72.57 ^{ab}
G6	50.77 ^d
Jupare c 2001	61.73 ^{bcd}
Bousselem	58.2 ^{cd}
Boutaleb	69.42 ^{abc}
Oued el bared	62.35 ^{bcd}
Mean	64.8
Max	80.16
Min	50.77
CV	13
LSD	11,64
Effet génotype	**

** significative ($P < 0.01$).

CONCLUSION

Les dommages oxydatifs induits par l'herbicide glyphosate affectent les paramètres physiologiques du blé. Ainsi, ces paramètres peuvent être utilisés comme critères pour sélectionner des génotypes adaptés au stress oxydatif. Notre étude a révélé des variations significatives entre les génotypes ($P < 0,05$). Les génotypes qui montrent une faible vitesse de dégradation de la chlorophylle et le taux de chlorophylle le plus faible présentent une faible sensibilité au stress oxydatif de ce fait la lignée G5 a été apparue comme la plus tolérante au stress oxydatif. Sur la base de nos résultats, la fuite d'électrolyte est plus importante chez la lignée G4 tandis que, la lignée G6 a enregistré la plus faible valeur indiquant qu'elle pouvait maintenir une intégrité membranaire élevée sous un stress oxydant. Nous pouvons conclure que les deux lignées G5 et G6 sont les plus appropriées aux conditions de stress oxydant.

CHAPITRE IV

***Etude de la stabilité du rendement en grains
et du poids de mille grains chez génotypes de
blé dur (triticum durum Desf.) Sous
Conditions semi arides***

الملخص

تهدف برامج تربية وتحسين النبات الى انتخاب أنماط وراثية مستقرة ومتكيفة مع مجموعة واسعة من الظروف البيئية. تهدف هذه الدراسة الى تحليل التفاعل بين النمط الوراثي والظروف البيئية وتحديد الأنماط الوراثية المناسبة والمستقرة من بين مجموعة من 10 أنماط وراثية مختلفة البنية الوراثية وذلك باستخدام طرق إحصائية مختلفة. جرت الدراسة على مدى أربع مواسم زراعية متتالية (2019-2020، 2020-2021، 2021-2022 و 2022-2023) في الحقول التجريبية التابعة للمعهد التقني للزراعات الواسعة (ITGC) سطيف. أظهرت النتائج أن الأنماط الوراثية G1، G3، G6 وواد البارد كانت مستقرة من حيث المردود الحبي، في حين تميزت الأنماط الوراثية G3 وواد البارد بثبات وزن الألف حبة. يكشف تحليل الارتباطات عن علاقة معنوية وإيجابية بين المؤشرات البارامترية b_i و CV_i (**0.969 و **0.924 على التوالي). علاوة على ذلك، يظهر المؤشر البياني b_i ارتباطاً إيجابياً ومعنوياً مع المردود الحبي و وزن الألف حبة (**0.70 و **0.840 على التوالي). تشير التحليل بالمركبات الأساسية إلى أن السلالات G1 و G5 و G6 مرتبطة بالمفهوم الديناميكي، حيث تُظهر السلالة G1 قيمة b_i قريبة من 1.

الكلمات المفتاحية: اختبار، مناسب، مستقر، إنتاجية، وزن الألف حبة.

RESUME

L'objectif principal des programmes de sélection végétale est de choisir des génotypes stables et adaptés à un large éventail d'environnements. La présente étude a été réalisée pour analyser l'interaction génotype-environnement et identifier les génotypes adaptés et stables parmi une collection de 10 génotypes, en utilisant différentes méthodes statistiques. L'étude s'est déroulée sur quatre saisons agricoles consécutives (2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 et 2022-2023) sur les sites expérimentaux de l'ITGC, à Sétif, en Algérie. Nos résultats montrent que les génotypes G1, G3, G6 et Oued el Bared étaient stables pour le rendement en grains, tandis que les génotypes G3 et Oued el Bared se distinguent par un poids de mille grains stables. L'analyse des corrélations révèle une relation significative et positive entre les indices paramétriques b_i et CV_i (respectivement 0,969** et 0,924**). De plus, l'indice b_i montre une association positive et significative avec le rendement en grains (GY) et le poids de mille grains (respectivement 0,70* et 0,840**). L'analyse en composantes principales indique que les lignées G1, G5 et G6 sont connectées au concept dynamique, avec la lignée G1 présentant une valeur b_i proche de 1.

Mots clés : sélection, adapté, stable, rendement, poids de mille grains.

ABSTRACT

The main goal of plant breeding programs is to choose genotypes that are stable and adapted to a wide range of environments. The present study was carried out to analyze the genotype-environment interaction and identify adapted and stable genotypes among a collection of 10 genotypes, using different statistical methods. The study was conducted over four consecutive agricultural seasons (2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, and 2022-2023) on the experimental sites of the ITGC, Sétif, Algeria. Our results show that the G1, G3, G6, and Oued el Bared genotypes were stable for grain yield, while the G3 and Oued el Bared genotypes stood out with a weight of a thousand stable grains. Correlation analysis reveals a significant and positive relationship between the parametric indices b_i and CV_i (respectively 0.969** and 0.924**). Furthermore, the b_i index shows a positive and significant association with grain yield (GY) and thousand-grain weight (0.70* and 0.840** respectively). Principal component analysis indicates that lineages G1, G5, and G6 are connected to the dynamic concept, with lineage G1 exhibiting a b_i value close to 1.

Keywords: selection, adapted, stable, yield, thousand-grain weight.

INTRODUCTION

Les céréales constituent un élément essentiel de l'alimentation humaine partout dans le monde. Parmi les céréales, le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) est cultivé sur environ 17 millions d'hectares dans le monde, représentant 8 % de la superficie mondiale de blé (Mansouri et al., 18). Dans le bassin méditerranéen, le blé dur est la céréale la plus cultivée, traditionnellement cultivée en conditions pluviales (Tedone et al., 2017). Ainsi, une grande partie de la production de blé dur est actuellement située dans des zones semi-arides, où le risque de changements climatiques extrêmes tels que la sécheresse et le stress thermique augmentera à l'avenir (Ceglar et al., 2021). Selon Jallouli et al. (2021), les sélectionneurs des plantes adoptent des stratégies pour les régions susceptibles à la sécheresse en sélectionnent des génotypes qui montrent un haut rendement en grain, une stabilité du rendement et une tolérance la sécheresse. La réussite des nouvelles variétés dépend de leurs performances élevées en termes de rendement et d'autres caractéristiques agronomiques essentielle (Mazibuko et al., 2024). La progression du rendement en grains est positivement liée à différents éléments tels que le nombre de grains par mètre carré, la biomasse, l'indice de récolte et la hauteur des plantes (Xia et al., 2012 ; Kirouani et al., 2023). Le phénotype d'un individu est une combinaison du génotype (G) et de l'environnement (E). En raison de l'interaction $G \times E$, les performances des variétés cultivées peuvent varier selon les environnements (Fasahat et al., 2015). La compréhension de l'interaction $G \times E$ est essentielle afin de déterminer précisément la stabilité des cultivars et d'améliorer la capacité de sélection dans les programmes de sélection. Pour explorer l'adaptation et la stabilité des génotypes, diverses méthodes ont été proposées. Le premier groupe contient les indices paramétriques qui présentent des propriétés appropriées sous certaines hypothèses statistiques, y compris une distribution normale et une homogénéité de variance, des erreurs et de leurs effets d'interaction, tels que le coefficient de régression (bi) Finlay et Wilkinson (1963), la variance des écarts par rapport à la régression (S^2_{di}) Eberhart et Russell (1966), l'indice de stabilité d'écovalence de Wricke (Wi^2) Wricke (1962), la variance de stabilité de Shukla (σ_i^2) (Shukla 1972), coefficient de variance environnemental (CVi) Francis et Kannenberg (1978) et composante de variance moyenne (θ_i) Plaisted et Peterson (1959). Le deuxième groupe comprend les indices non paramétriques qui constituent une alternative réalisable aux statistiques paramétriques car leurs performances sont basées sur des données classées de Nassar et Huhn (1987) et aucune hypothèse n'est nécessaire sur la distribution et l'homogénéité de la variance des erreurs, y compris celles de Nassar et Huhn NP(i)

(Thennarasu 1995). Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer les performances de certains génotypes de blé dur sur quatre années successives, sur la base de l'évaluation de certains indices paramétriques et non paramétriques.

MATERIALS ET METHODES

1- Le matériel végétal et les conditions expérimental

Les expérimentations ont été menées au cours de quatre campagnes agricoles successives : 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 et 2022-2023. Elles ont été réalisées en conditions pluviales à l'Institut Technique des Grandes Cultures de Sétif (ITGC), en Algérie. Le matériel végétal utilisé est déjà mentionné dans le Tableau 1 du Chapitre II.

2- Les paramètres mesurés

2-1 Les indices paramétriques

Indices	equation	références
Coefficient de regression (bi)	$b_i = \frac{\sum x_{ij} l_j}{\sum l_j^2}$	Finlay et Wilkinson (1963)
Ecovalence de Wricke (Wi ²)	$Wi^2 = \sum (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_j + \bar{x})^2$	Wricke (1962)
Écart par rapport à la régression (S ² di)	$S^2 di = \left[\sum_j d_i^2, (n-2) \right] - S_e^2 / r$	Eberhart et Russell (1966)
Coefficient de variance (CVi)	$cv_i = \left(\frac{\sigma}{x_i} \right) \times 100$	Francis et Kannenberg (1978)

2-2 Les indices non paramétrique

indices	equation	Références
Indices non paramétriques S ⁽¹⁾ et S ⁽²⁾ de Nassar et Huhn	$S^{(1)} = 2 \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m 1 r_{ij} - \bar{y}$	Nassar and Huhn (1987)
	$S^{(2)} = \sum_j^m \frac{1(r_{ij} - \bar{r}_i)^2}{(m-1)}$	
Indices non paramétriques de Thennarasu NP ⁽³⁾ et NP ⁽⁴⁾	$NP^{(3)} = \frac{\sum (r_{ij}^* - \bar{r}_i)^2 / m}{\bar{r}_i}$	Thennarasu (1995)
	$NP_i^{(4)} = \frac{2}{m(m-1)} \left(\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m r_{ij}^* - r_{ji}^* / \bar{r}_i \right)$	

3- Analyses statistiques

Les corrélations linéaires entre les paramètres ont toutes été réalisées à l'aide du logiciel Costat version 6.400, l'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide de R Core Team.

4- Analyse de stabilité

Les paramètres de stabilité ont été calculés à l'aide du logiciel en ligne STABILITYSOFT développé par Pour-Aboughadareh et al. (2019).

RESULTAT ET DISCUSSION

1- Les indices paramétriques de la stabilité

La sélection de génotypes stables avec un rendement élevé et un poids de mille grains améliorés est l'objectif principal des sélectionneurs de céréales. Cependant, Les interactions significatives génotype $\times$ environnement réduire le gain de la sélection et rendre difficile l'identification des génotypes idéales (Amelwork et al., 2023). Mesurer et comprendre l'interaction génotype $\times$ environnement est très important pour sélectionner des génotypes adaptés avec une adaptation adéquate aux environnements cibles (Nowosad et al., 2016). Pour cela, les sélectionneurs utilisent différentes méthodes pour identifier les génotypes stables et à haut rendement et déterminer s'ils réagissent positivement aux contraintes des conditions environnementales. Le choix de la meilleure méthode dépend de divers facteurs tels que le nombre des génotypes, la variation environnementale et le concept de la stabilité. Dans la présente étude, les résultats de l'analyse des paramètres de stabilité pour le rendement en grains sont présentés dans le tableau 12. Selon Finlay et Wilkinson (1963), les génotypes à faible coefficient de régression présentent une plus grande résistance aux changements environnementaux et sont adaptés à des environnements à faible rendement, tandis que les génotypes avec un coefficient de régression élevé sont très sensibles aux changements environnementaux et montrent une meilleure adaptabilité à des environnements à haut rendement. Les valeurs de coefficient de régression (b_i) variant de 0,52 à 1,47. Les génotypes G2, G3, G5, G6 et la variété Bousselam ont présenté des coefficients de régression supérieurs à 1 suggérant qu'ils sont bien adaptés aux conditions favorables. En revanche, les génotypes G1, Boutalab et Oued el Bared ont enregistré un coefficient de régression inférieur à l'unité ($b_i < 1$), ce qui confirme ils sont plus adaptés aux conditions pluviales (milieux pauvres), Sebbane (2021) a également suggéré que la variété Boutaleb était la plus stable dans les conditions semi arides.

L'écovalence (W_i^2) est un indice permet de mesurer la contribution du génotype à l'interaction génotype $\times$ l'environnement, le génotype ayant l'écovalence la plus faible étant considéré comme performant et stable. Les valeurs d'écovalence (W_i^2) montrent que la lignée G6 apparaît comme la plus stable avec le W_i^2 le plus faible (1,33), suivie par Bousselam

(6,55), et Jupare C 2001 (9,11). Cependant, la variété locale Boutaleb (120,7) et la lignée G2 (84,49) sont considérés comme des génotypes instables. Wardofa et Ararsa (2020) ont indiqué que les génotypes avec une écovalance (Wi^2) élevée contribuent largement à l'interaction génotype-environnement. Sur la base des valeurs de régression (S^2di), la lignée G6 était la plus stable. Ainsi, le génotype qui possède un rendement en grains le plus élevé, associé à un coefficient de régression qui ne diffère pas de 1, et une valeur S^2di nulle ou proche de zéro, est le génotype souhaité (Sabaghnia et al., 2006 ; Benjama et al., 2019), c'est le cas de la lignée G6 qui apparaît comme le génotype idéal.

Le coefficient de variance (CVi) qui aide à déterminer les génotypes stables grâce à la combinaison du coefficient de variation, du rendement moyen et de la variance environnementale a considéré Boutaleb (67,83) et G1 (82,48) comme les génotypes les plus stables et à haut rendement. Plusieurs chercheurs utilisent les indices paramétriques de stabilité pour sélectionner les génotypes stables pour le rendement en grains de blé dur (Hannachi et al., 2019), Bouchareb et Guendouz (2021), de l'orge (Assefa et al., 2021) et le riz (Rasz et al., 2019).

Pour le poids de mille grains, les valeurs du coefficient de régression (bi) variaient de 0,37 à 1,33. Les génotypes G1, G2, G4 et Oued el Bared ont présenté un poids de mille grains élevés et des valeurs de coefficient de régression supérieures à l'unité, ce qui suggère qu'ils peuvent se développer dans des conditions favorables. Cependant, les deux lignées G5 et G6 sont considérées comme les génotypes appropriés et adaptés aux environnements pauvres qui présentent des valeurs de coefficient de régression inférieures à l'unité. Il est intéressant de constater que selon le coefficient de variance (CVi), ces génotypes étaient performants et les plus appropriés. L'écovalance de Wricke (Wi^2) a classé les génotypes G3 (1,56), Bousselam (5,62), Oued El Bared (10,27) et G1 (10,96) comme les plus souhaitables. Bien que la lignée G4 (109,85) est enregistré la valeur la plus élevée, ce qui indique qu'il s'agit du génotype le plus sensible. En utilisant la statistique S^2di , les génotypes G3 et Boutaleb ont été classés comme les plus stables avec un poids de mille grains supérieurs à la moyenne.

CHAPITRE IV ETUDE DE LA STABILITE DU RENDEMENT EN GRAINS ET DU POIDS DE MILLE GRAINS CHEZ GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES

Tableau 12. Indices paramétriques de stabilité, rendement moyen (RDT, q. ha⁻¹) et poids de mille grains (PMG, g) pour les géotypes de blé dur testés.

Genotype	RDT (qx/ha)	PMG (g)	Rendement en grains (RDT)				Poids de mille grains (PMG)			
			bi	W _i ²	S ² di	CVi	bi	W _i ²	S ² di	CVi
G1	9,83	37,59	0,75	27,35	0,76	82,49	1,25	10,96	0,39	22
G2	11,16	34,65	1,47	84,49	1,32	141,64	0,78	30,44	3,46	16,89
G3	11,86	37,25	1,47	77,68	0,15	133,03	1,06	1,56	0,15	18,79
G4	7,93	36,16	0,89	11,74	1,07	121,65	1,58	109,85	9,52	31,48
G5	10,14	32,78	1,17	14,55	0,66	124,14	0,59	23,45	0,28	12,10
G6	9,76	29,89	1,06	1,33	0,02	116,12	0,37	52,23	0,12	8,30
Jupare	8,87	34,37	0,90	9,11	0,79	109,43	0,93	25,63	3,57	19,62
Bousselam	9,61	36,60	1,11	6,55	0,37	123,69	0,99	5,62	0,80	18,15
Boutalab	9,86	39,5	0,52	120,7	5,91	67,83	1,33	24,17	1,47	22,56
Oued el bared	8,09	36,78	0,67	40,90	0,54	89,96	1,12	10,27	1,21	20,45
Moyenne	9,71	35,55	1,01	39,44	1,16	111	1	29,418	2,097	19,034
Min	7,93	29,89	0,52	1,33	0,02	67,83	0,37	5,62	0,12	8,30
Max	11,86	37,59	1,47	120,7	5,91	141,64	1,58	109,85	9,52	31,48

RDT : rendement en grains, PMG : poids de mille grains, bi : coefficient de régression, W_i² : écovalece de wricke, S²di : variance des écarts par rapport à la régression, CVi : coefficient de variance.

2- Les indices non paramétriques de la stabilité

Les mesures non paramétriques évaluées pour les géotypes testés sont exposées dans le tableau 13. Les statistiques non paramétriques de Huhn et Nassar Si (i) basées sur le classement des géotypes dans les environnements, les géotypes avec des valeurs minimales sont les plus stables. Pour le rendement en grains, en considérant les valeurs de Si ⁽¹⁾, la lignée G6 est révélée comme la plus stable, avec la plus petite valeur Si ⁽¹⁾ = 0, 67. C'est également le cas pour la statistique Si ⁽³⁾, dans laquelle la lignée G6 est considérée comme stable par rapport aux autres géotypes avec un Si ⁽³⁾ = 0,18.

Selon les deux statistiques de stabilité NP⁽³⁾ et NP⁽⁴⁾ décrites par Thennarasu (1995), G2 et Jupare C 2001 ont été identifiés comme instables avec les valeurs les plus élevées de NP ⁽³⁾ et NP ⁽⁴⁾. En revanche, la lignée G6 a été identifiée comme plus stable avec les valeurs les plus faibles de NP⁽³⁾ et NP⁽⁴⁾. Ces indices non paramétriques ont été utilisé par Verma et singh (2020) pour la sélection des géotypes stables et adaptés de blé tendre.

Pour le poids de mille grains, Selon les valeurs de l'indice Si ⁽¹⁾, les deux lignées G1 et G6 sont les plus stables avec les valeurs les plus basses de Si ⁽¹⁾ = 1. Alors que les deux lignes G2 et G4 présentaient des valeurs plus élevées de Si ⁽¹⁾, avec 4,33 et 5,17 respectivement ce qui suggéré une stabilité plus faible. Selon les valeurs de Si ⁽³⁾, les lignées G1 et G3 ont enregistré une plus grande stabilité avec le poids de mille grains le plus élevé, tandis que la ligne G2 était la plus instable. Les valeurs de NP⁽³⁾ ont révélé que la variété oued el bared était la plus stable avec la valeur la plus faible, suivie par boutaleb et G1 avec 0,34, 0,35 et 0,36

CHAPITRE IV ETUDE DE LA STABILITE DU RENDEMENT EN GRAINS ET DU POIDS DE MILLE GRAINS CHEZ GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES

respectivement. Plusieurs études identifient des génotypes stables pour le poids de mille grains utilisant les indices de stabilité (Kumar et *al.*, 2014 ; Benkadja et *al.*, 2021 ; Assefa et *al.*, 2021).

Tableau 13. Les indices non paramétriques de la stabilité pour les génotypes de blé dur testés.

Génotype	Rendement en grains				Poids de mille grains			
	S ⁽¹⁾	S ⁽³⁾	NP ⁽³⁾	NP ⁽⁴⁾	S ⁽¹⁾	S ⁽³⁾	NP ⁽³⁾	NP ⁽⁴⁾
G1	3,67	3,85	0,38	0,56	1	0,29	0,36	0,14
G2	3,67	8,50	0,91	0,92	4,33	9,56	0,74	0,96
G3	4,67	6,92	0,51	0,72	1,67	0,67	0,15	0,22
G4	4,00	7,33	0,57	0,89	5,17	8,48	0,68	0,90
G5	4,00	4,46	0,39	0,62	1,17	0,85	0,80	0,36
G6	0,67	0,18	0,09	0,12	1	2,00	2,55	0,67
Jupare	4,50	9,12	0,47	1,06	3,83	6,29	0,59	0,90
Bousselam	3,00	3,09	0,24	0,55	3,17	3,26	0,39	0,55
Boutalab	5,33	9,00	0,64	0,89	3,17	3,00	0,35	0,38
Oued el bared	3,33	3,82	0,53	0,61	2,17	1,30	0,34	0,32
Moyenne	3,68	5,63	0,47	0,69	2,67	3,57	0,69	0,54
Min	0,67	0,18	0,09	0,12	1	0,29	0,15	0,14
Max	5,33	9,12	0,91	1,06	5,17	9,56	2,55	0,96

S⁽¹⁾, S⁽³⁾ les statiques non paramétriques de Nassar et Huhn, NP⁽³⁾, NP⁽⁴⁾ les statiques non paramétriques de de Thennarasu.

3- Corrélations entre le rendement en grains, le poids du mille grains et les différents indices de stabilité

Les résultats des corrélations entre le rendement moyen et les différents indices de stabilité sont montrés dans le tableau 14. Le rendement en grains est positivement et significativement associé au coefficient de régression (bi), ce qui indique que ce paramètre était idéal pour choisir les génotypes productifs, ces résultats similaires à ceux observés chez le blé de printemps (Racz et *al.*, 2019). De plus, le coefficient de régression (bi) est également révélé une corrélation positive et significative avec CVi, Suggérant un rôle similaire de ces paramètres dans le classement des génotypes stables, l'étude de Bendjama et *al.* (2019) indique le meme résulta. L'indice non paramétrique NP⁽³⁾ présente des relations significatives avec S⁽³⁾ et NP⁽⁴⁾. Par contre, Bendada et *al.* (2023) trouvent une relation positive significative entre ces indices. En Outre, Il est important noter les corrélations non significatives entre les indices paramétriques S²di et CVi indiquant l'indépendance de ces paramètres. Par conséquent, l'indice bi montrer une corrélation non significative avec W_i². Les statistiques non paramétriques S⁽¹⁾ et S⁽³⁾ présentaient une association positive.

Les résultats des corrélations entre le poids de mille grains et les indices de stabilité est montrée dans le tableau 15, le poids de mille grains montre une association positive et

CHAPITRE IV ETUDE DE LA STABILITE DU RENDEMENT EN GRAINS ET DU POIDS DE MILLE GRAINS CHEZ GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES

significative avec le coefficient de régression bi et l'indice CVi , et une corrélation négative avec le statique non paramétrique $NP^{(3)}$. Les autres indices de stabilité ne montrent aucune corrélation significative avec le poids de mille grains. L'écovalance de Wricke Wi^2 montre une relation positive et non significative avec toutes les paramètres non paramétriques. En outre, Le paramètre de stabilité $NP^{(3)}$ s'associe négativement et significativement au coefficient de régression bi , révèle ainsi une corrélation non significative avec les autres indices de stabilité.

Tableau 14. Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les indices de stabilité utilisés et de rendement en grains.

	RDT	bi	Wi ²	S ² di	CVi	S ⁽¹⁾	S ⁽³⁾	NP ⁽³⁾	NP ⁽⁴⁾
RDT	1								
bi	0.70*	1							
Wi	0.49 ^{ns}	-0.012 ^{ns}	1						
Sdi	0.0 ^{ns}	-0.523 ^{ns}	0.719*	1					
CVi	0.4 ^{ns}	0.924**	-0.248 ^{ns}	-0.606 ^{ns}	1				
S ⁽¹⁾	0.12 ^{ns}	-0.148 ^{ns}	0.575 ^{ns}	0.543 ^{ns}	-0.24 ^{ns}	1			
S ⁽³⁾	0.11 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.580 ^{ns}	0.528 ^{ns}	-0.005 ^{ns}	0.847**	1		
NP ⁽³⁾	0.18 ^{ns}	0.116 ^{ns}	0.700*	0.430 ^{ns}	0.073 ^{ns}	0.634*	0.809**	1	
NP ⁽⁴⁾	-0.058 ^{ns}	-0.046 ^{ns}	0.411 ^{ns}	0.412 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.841**	0.963**	0.77**	1

* significative (P < 0.05), ** significative (P < 0.01), non significative (ns).

Tableau 15. Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les indices de stabilité utilisés et le poids de mille grains.

	PMG	bi	Wi ²	S ² di	CVi	S ⁽¹⁾	S ⁽³⁾	NP ⁽³⁾	NP ⁽⁴⁾
PMG	1								
bi	0.840**	1							
Wi ²	-0.273 ^{ns}	0.242 ^{ns}	1						
Sdi	0.085 ^{ns}	0.542 ^{ns}	0.836**	1					
CVi	0.713*	0.969**	0.405 ^{ns}	0.722*	1				
S ⁽¹⁾	0.247 ^{ns}	0.480 ^{ns}	0.523 ^{ns}	0.844**	0.631 ^{ns}	1			
S ⁽³⁾	-0.074 ^{ns}	0.184 ^{ns}	0.587 ^{ns}	0.803**	0.380 ^{ns}	0.913**	1		
NP ⁽³⁾	-0.856**	-0.680*	0.399 ^{ns}	-0.084 ^{ns}	-0.609 ^{ns}	-0.260 ^{ns}	0.024 ^{ns}	1	
NP ⁽⁴⁾	-0.412 ^{ns}	-0.119 ^{ns}	0.614 ^{ns}	0.688*	0.098 ^{ns}	0.764*	0.915**	0.342 ^{ns}	1

PMG : poids de mille grains, bi : coefficient de régression, Wi² : écovalance de wricke, S²di : variance des écarts par rapport à la régression, CVi : coefficient de variance, S⁽¹⁾, S⁽³⁾ les statiques non paramétriques de Nassar et Huhn, NP⁽³⁾, NP⁽⁴⁾ les statiques non paramétriques de de Thennarasu. * significative (P < 0.05), ** significative (P < 0.01), non significative (ns).

4- Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP), l'une des méthodes d'analyse multivariée, est utile pour mieux comprendre les relations entre un ensemble de traits. L'analyse des composantes principales de la matrice de corrélation de rang est illustrée aux figures 14 et 15.

Pour le rendement en grains, les deux premiers PC expliquent 48,7 % et 29 % respectivement soit un total de 77 % de la variation totale (Figure 14). Le premier axe PC1 comprend tous les indices non paramétriques et les deux paramètres W_i et S^2d_i , tandis que le deuxième axe PC2 est associé au rendement en grains (GY) et aux deux paramètres b_i et CV_i . Nos résultats ont illustré que les lignées G1, G5 et G6 étaient groupées dans le concept dynamique avec un rendement en grains supérieur à la moyenne. Alors que la lignée G1 présentait une valeur b_i proche de 1, cela indique une large adaptation à divers environnements. A l'inverse, le concept statique inclut les génotypes Boutaleb, G2 et G3 à haut rendement en grain et une variété à faible rendement Jupare C 2001. Des résultats similaires ont été trouvée par Guendouz et Bendada (2022), ont constaté que les deux indices CV_i et b_i étaient associés au concept dynamique chez les génotypes de l'orge.

En revanche, selon les résultats affichés dans la figure 14, les axes PC1 et PC2 sont les plus descriptifs de la variation totale et représentent 88,1 %. La première composante, avec 51,5%, renferme tous les indices à l'exception des statistiques $NP^{(3)}$, b_i , et le poids de mille grains qui sont associés au deuxième axe avec 36,6% de variation. Le concept dynamique comprend les génotypes G1, G3, Bousselam et Oued avec un poids de mille grains élevés, tandis que les lignes G5 et G6 sont connectées à ce concept mais avec un poids de mille grains inférieurs.

La stabilité statique est similaire au concept biologique d'homéostasie : un génotype stable a aptitude à maintenir un rendement dans tous les environnements (Abdipour et *al.*, 2017). Ce type n'est pas souhaitable par la plupart des sélectionneurs et des agronomes, puisque le génotype ne montrera aucune réponse aux différents apports (les engrais, la température et l'humidité). Bien que, Le concept dynamique implique une réponse de rendement stable dans tous les environnements, qui est toujours parallèle à la réponse moyenne des génotypes testés malgré l'absence d'interaction $G \times E$. Ce concept est recommandé pour les études de stabilité des rendements (Mohamadi et *al.*, 2010). Contrairement à la mesure de stabilité statique, la mesure de stabilité dynamique dépend de l'ensemble spécifique de génotypes inclus dans le test (Lin et *al.* 1986).

CHAPITRE IV ETUDE DE LA STABILITE DU RENDEMENT EN GRAINS ET DU POIDS DE MILLE GRAINS CHEZ GENOTYPES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) SOUS CONDITIONS SEMI ARIDES

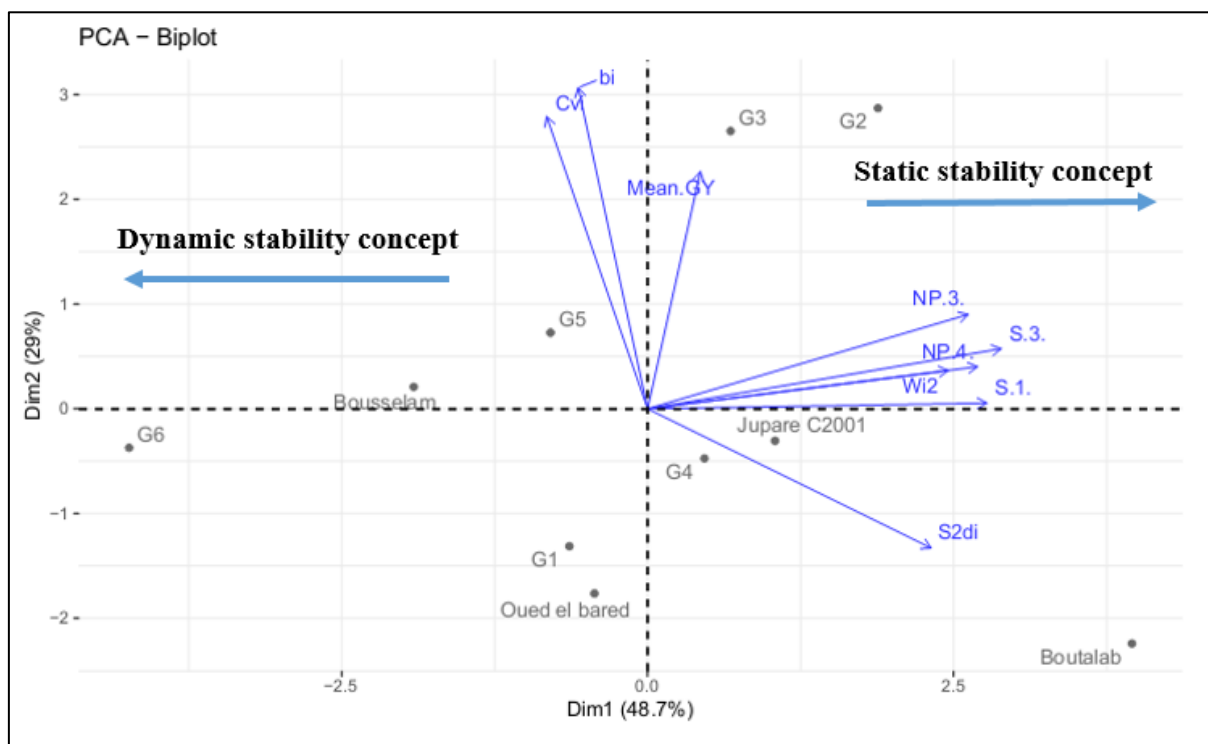


Figure 13. Biplot de AC1 et AC2 de la matrice de corrélation de rang des paramètres de stabilité avec le rendement en grains.

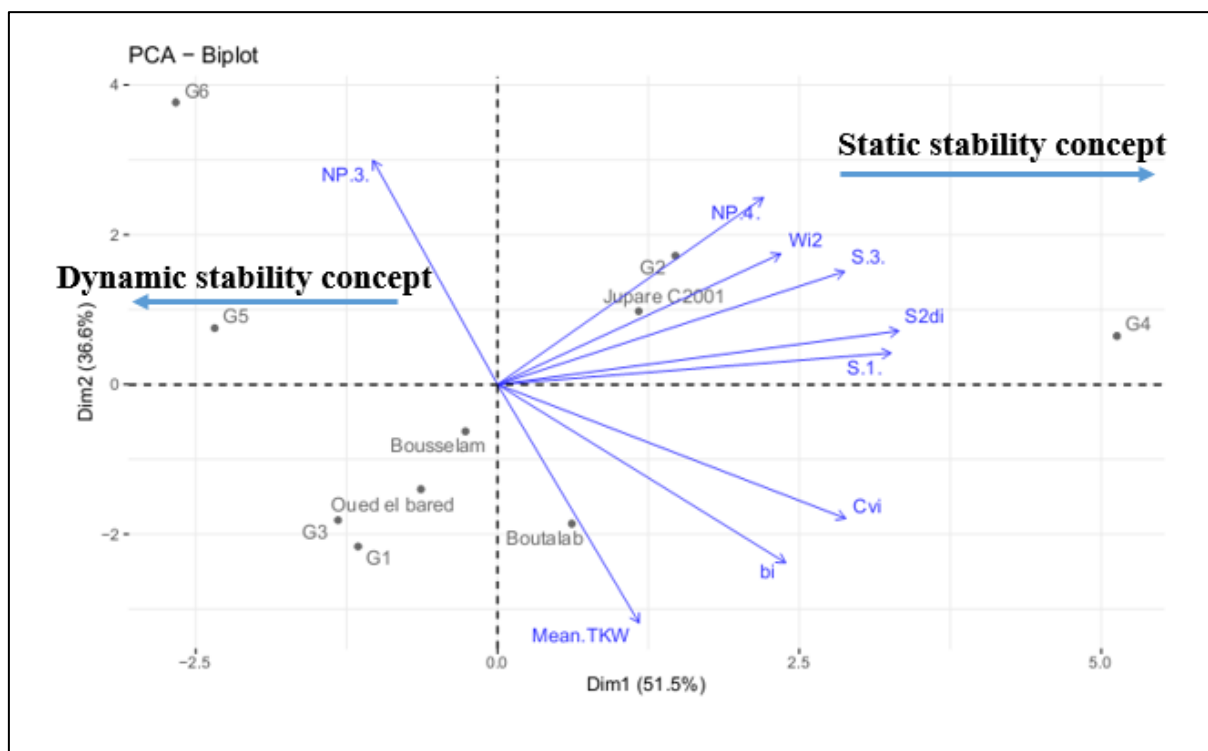


Figure 14. Biplot de AC1 et AC2 de la matrice de corrélation de rang des paramètres de stabilité avec le poids de mille grains.

CONCLUSION

En résumé, notre étude établit que les approches paramétriques et non paramétriques sont appropriées pour la sélection des génotypes stables de blé dur. Les résultats obtenus ont révélé que pour le rendement en grains, les génotypes G1, G6 et Bousselam ont été sélectionnés comme les plus stables, tandis que G3 et Oued el bared sont apparus comme étant très stables pour poids de mille grains. Cependant, la lignée G4 a été identifiée comme un génotype instable avec un rendement en grains élevé et le meilleur poids de mille grains. Sur la base de l'analyse en composantes principales, les génotypes G1, G5 et G6 ont été impliqués dans le concept dynamique avec un rendement en grains élevé, et les génotypes G3, Bousselam et Oued el bared ont été connectés à ce concept avec un poids de mille grains élevés. Les résultats de la corrélation entre les indices étudiés indiquent des fortes associations entre tous les indices non paramétriques, démontrant qu'un seul de ces indices serait approprié pour sélectionner des génotypes appropriés dans les conditions semi arides.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La culture des céréales est très ancienne en Afrique du Nord-Est, notamment en Algérie. La quasi-totalité de l'alimentation de la population mondiale provient des céréales. Parmi les céréales, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une culture importante qui a été cultivée dans les régions semi-arides caractérisées par des précipitations variables et des températures élevées.

Ces contraintes imprévisibles surviennent généralement lors des dernières étapes du cycle de développement des céréales, réduisant la durée et le taux de remplissage des grains, entraînant une perte importante de rendement et affectant les fonctions physiologiques de la plante. La sélection est l'une des méthodes les plus efficaces pour faire face à ces déficits, grâce aux sélections des génotypes adaptées aux différents stress abiotiques et se caractérisant par un rendement élevé et stable.

La présente étude a été menée durant deux saisons agricoles 2021-2022 et 2022-2023 se fixe sur la caractérisation agro-physiologique de quelques génotypes de blé dur cultivés en conditions semi arides afin de sélectionner les génotypes plus adaptés à ces conditions.

L'analyse des réponses agro-physiologiques de dix génotypes de blé dur, afin de déterminer les principaux génotypes adaptés aux environnements semi-arides durant les deux saisons de culture 2021-2022 et 2022-2023 montre que l'effet année est hautement significative pour la majorité des caractères étudiés ce qui suggère que les variations des conditions climatiques entre les deux années affectent significativement le rendement en grain et ses composantes ainsi que altère les différents processus physiologiques de la plante. L'année 2021-2022 a été particulièrement favorable à l'obtention de meilleurs rendements en grains. Les génotypes G2 et G3 se sont révélés les plus productifs, tandis que les variétés Bousselam et Jupare C 2001 ont montré une productivité satisfaisante au cours de cette saison.

L'analyse du comportement physiologique montre que les génotypes G1 et G3 sont les plus recommandés dans des environnements défavorables, grâce à une meilleure capacité à maintenir la teneur en eau durant l'année difficile 2022-2023.

L'herbicide glyphosate peut générer un stress oxydant qui peut affecter négativement la physiologie des plantes et induit une altération cellulaire, ce qui déclenche le système de défense par accumulation des différents osmolytes. D'après nos résultats les génotypes G1 et G3 sont les plus sensibles au stress oxydant induit. De plus, une forte dégradation de la teneur en chlorophylle a été observée chez la variété locale Bousselam.

CONCLUSION GENERALE

L'accumulation de la proline et des sucres solubles chez les géotypes testés reflète est une réponse adaptative aidant à réduire les effets de stress oxydant. Par conséquent, les géotypes G5, G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared et Bousselam sont les plus adaptés et capables de limiter les dommages oxydatifs.

L'étude de la stabilité du rendement en grain et de poids de mille confirme que les indices paramétriques et non paramétriques sont utiles pour exploiter l'interaction Géotype-environnement ainsi que et la sélection des géotypes les plus stables. On conclure que les géotypes G1, G6 et Bousselam se distingue par un rendement en grains stable bien que les géotypes G3 et Oued el bared affichent une stabilité pour le poids de mille grains.

Enfin, pour mieux comprendre les effets du stress oxydatif sur les géotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*) et améliorer leur résistance, il est crucial de concentrer des efforts sur l'identification de marqueurs de tolérance au stress et sur la compréhension approfondie des mécanismes d'adaptation, notamment par l'analyse et la quantification des enzymes antioxydantes et des composés associés. De plus, une approche moléculaire intégrée est nécessaire pour détecter et caractériser les gènes de tolérance au stress oxydatif, facilitant ainsi le développement de variétés de blé dur plus résilientes face aux contraintes environnementales.

***REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE***

Référence bibliographique

- Abdipour, M., Ramezani, H.R., Bavei, V., and Talaee, S. (2013) Effectiveness of Canopy Temperature and Chlorophyll Content Measurements at Different Plant Growth Stages for Screening of Drought Tolerant Wheat Genotypes. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 13, 1325-1338. <https://dx.doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2013.13.10.11045>
- Abdipour, M., Vaezi, B., Younessi-Hamzekhanlu M, Ramazani SHR. (2017). Nonparametric phenotypic stability analysis in advanced barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 20, 305-314. <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0050-0>.
- Afzal, S., Chaudhary, N., & Singh, N. K. (2021). Role of soluble sugars in metabolism and sensing under abiotic stress. *Plant growth regulators: signaling under stress conditions*, 305-334.
- Ahmad, F., Singh, A., & Kamal, A. (2020). Osmoprotective role of sugar in mitigating abiotic stress in plants. Protective chemical agents in the amelioration of plant abiotic stress: biochemical and molecular perspectives, 53-70.
- Ahmad, P., Jamsheed, S., Hameed, A., Rasool, S., Sharma, I., Azooz, M., & Hasanuzzaman, M. (2014). Drought stress induced oxidative damage and antioxidants in plants. In *Oxidative damage to plants* (pp. 345-367). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00011-3>
- Ahsan, N., Lee, D.G., Lee, K.W., Alam, I., Lee, S.H., Bahk, J.D., Lee, B.H. (2008). Glyphosate induced oxidative stress in rice leaves revealed by proteomic approach. *Plant Physiology and Biochemistry* 46, 1062–1070. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.07.002>.
- Aklilu, E., Bidir, A., Yasin, H et al (2020) Stability analysis of seed yield of Ethiopian caraway (*Trachyspermum ammi* L. Sprague ex Turrill) genotypes in multi-environment trials. *Cogent Food Agric*, 6(1), 1786312. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1786312>.
- Alina, R.U.J.A., Ioan, T., Bulai, A. and Alagapie, A.L. (2021). The influence of climate change on the leaf area from the leaf flag level to the spring oats. *Life science and sustainable development*, 2(1), pp.123-127. <https://doi.org/10.58509/lssd.v2i1.88>.
- Allali, K. (2015). Amélioration de la production du blé dur sous-systèmes de culture innovante. Magister en agronomie. Université Ferhat Abbas Sétif 1. 131P.
- Alqudah, A.M., and Thorsten, S. (2015). Barley Leaf Area and Leaf Growth Rates Are Maximized during the Pre-Anthesis Phase. *Agronomy* 5, no. 2: 107-129. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020107>.
- Amelework, A., Bairu, M.W., Marx, R. et al (2023) Genotype× environment interaction and stability analysis of selected cassava cultivars in South Africa. *Plants*, 12(13), 2490. <https://doi.org/10.3390/plants12132490>
- Amist, N., & Singh, N. B. (2020). The role of sugars in the regulation of environmental stress. In *Plant Life Under Changing Environment* (pp. 497-512). Academic Press.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Anzer, U.I., Ashok, K.C., Satyaveer, S.D., and Renu, M. (2018). Cell membrane stability- an important criterion for selection of heat tolerant genotypes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Applied and Natural Science* 9 (4): 1894 – 1900. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i4.1458>.
- Atar, F., Güney, D., Bayraktar, A., Yıldırım, N., and Turna, I. (2020). Seasonal change of chlorophyll content (spad value) in some tree and shrub species, *Turkish Journal of Forest Science*, 4(2), 245- 256. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.711389>.

Ayala, A., Muñoz, M. F., & Argüelles, S. (2014). Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2014.

Bachiri, H. (2021). Comportement de Quelques Génotypes de Blé Tendre (*Triticumaestivum* L.) Sous Différents Niveaux de Régime Hydrique et dans Deux Zones Agro-Climatiques Contrastées en Algérie (Subhumide et semi-aride). Doctorat LMD 3ème cycle en sciences Agronomiques. Ecole nationale supérieure d'agronomie El Harrach Alger. P 157

Bahlouli, F. (2006). Etude de la contribution des assimilats de la tige à l'adaptation du blé dur (*Triticumdurum*Desf.) aux stress abiotiques sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat institut national agronomique El Harrach Alger.

Bajji, M., Lutts, S and Kinet, J.M. (2001). Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum*Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science* 160(4): 669–681. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00443-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00443-X).

Bali, A.S., Sidhu, G.P.S. (2019). Abiotic Stress-Induced Oxidative Stress in Wheat. M. Hasanuzzaman et al. (eds.), *Wheat Production in Changing Environments*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1079/9781789248098.0019>.

Barrs, H.D, Weatherly, P.E. (1962). A Re-Examination of Relative Turgidity for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>

Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5.

Bayoumi, Y.A., Dakhly, D.M., Bassiouny, Y.A., and Hashish, N.M. (2015). Addition of growth hormone to the microflare stimulation protocol among women with poor ovarian response. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 131(3), pp.305-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2015.05.034>.

Bazzaz, M., Khaliq, Q.A., Karim, Md.A., Al-Mahmud, A. and Khan, Md.S.A. (2015) Canopy Temperature and Yield Based Selection of Wheat Genotypes for Water Deficit Environment. *Open Access Library Journal*, 2: e1917. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101917>.

Ben Naceur, M., Nailly, M., & Selmi, M. (1999). Effet d'un déficit hydrique, survenant à différents stades de développement du blé, sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement. *MEDIT*, 2 : 53-60.

Benbalkacem, A. (2022). Principes d'amélioration des plantes : stratégies de sélection variétale des céréales en Algérie. Journées scientifiques sur la Connaissance et le Savoir, 16-17 Mai 2022, Faculté SNV- STU and LCVRN, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie.

Benbelkacem A. 2014. The history of wheat breeding in Algeria. *Proceedings of the International Symposium on Genetics and Breeding of Durum Wheat (Options Méditerranéennes): Série, A. Séminaires Méditerranéens*. No. 110. 2014.

Bendada, H. (2021). Contribution à la sélection de l'adaptation de quelques génotypes d'orge (*Hordeumvulgare* L.) dans les conditions agro-climatiques semi-arides de la région de Sétif. Doctorat 3 ème cycle (LMD) Spécialité : Sciences Agronomiques, Option : Production et Protection des végétaux. Université Mohamed Boudiaf M'sila. P133.

Bendada, H., Mehanni, O., Louahdi, AN. et al (2023) Efficiency of Parametric and Non-Parametric Indices as the Indicators of Grain Yield Stability of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes under Rainfall Conditions. *Agric Sci Dig*. <https://doi.org/10.18805/ag.DF-537>.

- Bendjama, A., Ramdani, S. (2021). Genetic variability of some agronomic traits in a collection of wheat (*Triticum turgidum* L. ssp) genotypes under South Mediterranean growth conditions. Italian Journal of Agronomy, (AOP). <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1976>.
- Bendjama, A., Solonechnyi, Bouzerzour, H., Ramdani, S. (2019) Parametric stability analysis of durum wheat yield (*triticum durum* desf). Plant Breed. Seed Prod. 633.11:631.5 1. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2019>.
- Benkadja, S., Maamri ,K., Guendouz, A. et al (2022) Stability analysis for grain yield and thousand kernel weight of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes growing under semi-arid conditions. Agric Sci Tech 14. 34-43. <https://doi.org/10.15547/ast.2022.02.017>.
- Benmahammed, A., Bouzerzour, H., Mekhlouf, A., et 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* L. var durum) conduites sous contraintes hydrique. Recherche Agronomique, INRA., 21: 37-47.
- Benniou, R., Badache, F., Regoub, A., and Bendada, H. (2019). Etude comparative du comportement et de l'adaptation de différents génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride dans l'Est de l'Algérie. Revue Agriculture. 09(1): 16 – 31, (2018).
- Bin, P., Huang, R., & Zhou, X. (2017). Oxidation resistance of the sulfur amino acids: methionine and cysteine. BioMed research international, 2017.
- Bogale, A., Tesfaye, K. (2016). Relationship between grain yield and yield components of the Ethiopian durum wheat genotypes at various growth stages. Tropical and subtropical agroecosystems, 19(1), 81-91.
- Bouchemal, K. (2018). Etude des enzymes du stress oxydatif chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : caractérisation biochimique et moléculaire. Doctorat 3ème cycle en Biotechnologie, Biologie et Environnement, option Biotechnologie et Génomique Végétales. Université des frères Mentouri Constantine. P 124.
- Boudersa, N. (2022). Diversité biologique, biochimique, phytochimique et génétique chez deux genres de céréales (*Triticum* et *Hordeum*). Thèse de Doctorat 3ème Cycle. Université Frères Mentouri Constantine -1-. 134P.
- Caglar, O., Ozturk, A., Aydin, M., Bayram, S. (2011). Paraquat tolerance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Journal of animal and veterinary advances* 10 (supplement): 3363-3367 ,2011. <https://doi.org/10.3923/javaa.2011.3363.3367>.
- Ceglar, A., Toreti, A., Zampieri, M., Royo, C. (2021) Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. Environ Res Lett 16(10) 104049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d68>.
- Chahbar, S., and M. Belkhodja. "Water deficit effects on morpho-physiological parameters in durum wheat." Journal of Fundamental and Applied Sciences 8.3 (2016): 1166-1181. <https://doi.org/10.4314/jfas.v8i3.28>
- Chennafi, H., Bouzerzour, H., Aidaoui, A., Chenafi, A. (2006). Approche d'évaluation du déficit climatique pour la pratique d'une irrigation déficitaire sur blé dur en milieu semi-aride des hautes plaines orientales d'Algérie. In proceedings du 3eme Congrès Méditerranéen «WATMED », Tripoli (Liban),11-117.
- Choudhary, A., Kumar, A., & Kaur, N. (2020). ROS and oxidative burst: Roots in plant development. Plant Diversity, 42(1), 33-43.
- Chourghal, N., Belguerri, H., Maamri, K., Bahlouli, F., Salamani, A., & Benaini, M. (2023). Diagnosis of the rainfall-wheat yield relationship in the current and future climate change conditions in Eastern Algeria. Biosystems Diversity, 31(2), 158–162.doi:10.15421/012316
- chouter, A., Benniou, R., Sebbane, M. and Louahdi, N. (2022). Effect of Tillage Systems on Durum Wheat Production with Different Rotations in Semi-Arid Area of Algeria. Agricultural Science Digest. DOI: 10.18805/ag.DF-438

- Chowdhury, J.A., Karim, M.A., Khaliq, Q.A., and Ahmed, A.U. (2017). Effect of drought stress on bio-chemical change and cell membrane stability of soybean genotypes. *Bangladesh Journal of Agricultural Research* 42(3): 475- 485, September 2017. <https://doi.org/10.3329/bjar.v42i3.34506>.
- Cordiano, R., Di Gioacchino, M., Mangifesta, R., Panzera, C., Gangemi, S., & Minciullo, P. L. (2023). Malondialdehyde as a potential oxidative stress marker for allergy-oriented diseases: an update. *Molecules*, 28(16), 5979.
- Dai, J., Bean, B., Brown, B., Bruening, W., Edwards, J., Flowers, M., Karow, R., Lee, C., Morgan, G., Ottman, M., Ransom, J. and Wiersma, J. 2016. Harvest index and straw yield of five classes of wheat. *Biomass and Bioenergy*, 85: 223-227.
- Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in environmental science*, 2, 53. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>
- Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and experimental botany*, 109, 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021>
- Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Nature et Technologies*. n° 01: 45-53.
- Eberhart, SAT., Russell. W.A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.: 1,943. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>
- Enneb, H., Ben Yahya, L., Ilyas, M., Asaram Dhale, D., Bagues, M and Nagaz, K. (2020). Influence of Water Stress on Growth, Chlorophyll Contents and Solute Accumulation in Three Accessions of *Vicia faba* L. from Tunisian Arid Region. *Abiotic stress in plants*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94563>.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Crop Prospects and Food Situation - Quarterly Global Report n°. 4, December (2020). Rome. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., Siddique, K.H. 2012. Drought stress in plants: an overview. pp. 1-33. In: *Plant responses to drought stress. From morphological to molecular*
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms, and management. *Sustainable agriculture*, 153-188
- Fasahat, P., Rajabi, A., Mahmoudi, SB. et al (2015) An overview on the use of stability parameters in plant breeding. *Biometrics Biost Int J.* 2(5). 00043. <https://doi.org/10.15406/bbij.2015.02.00043>.
- Fellahi, Z., Hannachi, A., Bouzerzour, H., & Boutekrabt, A. (2013). 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(1).
- Fellahi, Z., Hannachi, A., Ferras, A., Oulmi, A., Boutalbi, W., Bouzerzour, H., & Benmahammed, A. (2017). analysis of the phenotypic variability of twenty f3 biparental populations of bread wheat (*triticum aestivum*.) evaluated under semi-arid environment. *Journal of Fundamental and Applied Science*. ISSN 1112-9867: 102-118.
- Feng, F., Han, Y., Wang, S., Yin, S., Peng, Z., Zhou, M., Gao, W., Wen, X., Qin, X., and Siddique, K.H.M. (2018). The Effect of Grain Position on Genetic Improvement of Grain Number and Thousand Grain Weight in Winter Wheat in North China. *Frontiers plant science*. 9: 129. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.00129>.
- Finkel, T (2011). Signal transduction by reactive oxygen species. *The Journal of Cell Biology*. 2011;194(1):7–15. <http://dx.doi.org/10.1083/jcb.201102095>.
- Finlay, KW., Wilkinson, GN. (1963) Adaptation in a plant breeding programme. *Aust J Agric Res.* 14: 742-754. <https://doi.org/10.1071/AR9630742>.

- Francis, TR., and Kannenberg, LW. (1978) Yield Stability Studies in Short-Season Maize. 1. A Descriptive Method for Grouping Genotypes. *Can. J. Plant Sci.*, 58, 1029-1034. <https://doi.org/10.4141/cjps78-157>.
- Freitas-Silva, L., Rodríguez-Ruiz, M., Houmani, H., da Silva, L.C., Palma, J.M., and Corpas F.J. (2017). Glyphosate-induced oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* affects peroxisomal metabolism and triggers activity in the oxidative phase of the pentose phosphate pathway (OxPPP) involved in NADPH generation. *Journal of Plant Physiology*. 218: 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.08.007>.
- Frih, B., Oulmi, A., Guendouz, A., Bendada, H., Selloum, S. (2021), Statistical Analysis of the Relationships Between Yield and Yield Components in Some Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes Growing under Semi-Arid Conditions. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 2021, 12(4), 385-392. <https://doi.org/10.23910/1.2021.2431>.
- Gomes, M. P., Le Manac'h, S. G., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lucotte, M and Juneau, P. (2017). Glyphosate-Dependent Inhibition of Photosynthesis in Willow. *Front. Plant Science*. 8: 207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00207>.
- Gomes, M. P., Smedbol, E., Chalifour, A et al. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 65, No. 17, pp. 4691–4703. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru269>.
- Guendouz, A., Frih, B., and Oulmi, A. (2021). Canopy Cover Temperature & Drought Tolerance Indices in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes under Semi-arid Condition in Algeria. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 2021, 12(6), 638-644. <http://dx.doi.org/10.23910/1.2021.2508>
- Guendouz, A., Bendada, H. (2022). Stability analysis for the grain yield of some barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes growing under semi-arid conditions. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 13 (Feb,2), 172-178. <https://doi.org/10.23910/1.2022.2469>.
- Hacini, N. (2014). Etude de l'interaction Génotype X Environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives. Thèse de doctorat en biologie végétale. Département de biologie. Université Badji Mokhtar -Annaba – 120p.
- Hamli, S., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Oulmi, A., Kadi, K., et Addad, D. (2015). Déterminisme génétique des caractères morpho-physiologiques liés au rendement chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride des hauts plateaux Sétifiens, Algérie. *Européen Scientific Journal*. 12: 146-160. <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/5471>
- Hannachi, A., Fellahi, Z. E. A. (2023). Efficiency of index-based selection for potential yield in durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) ssp. *turgidum* conv. *durum* (Desf.) Mackey] lines. *Italian Journal of Agronomy*, 18(1). <https://doi.org/10.4081/ija.2023.2182>.
- Hannachi, A., Fellahi, Z., Bouzerzour, H et al. (2013). Correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under rainfed conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 2013, vol. 3, no 2.
- Hannachi, A., Fellahi, Z., Bouzerzour, H. (2019) Analysis of adaptability and stability of some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties to the south Mediterranean conditions. *Rev Agric*. 10. 56-67.
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022). Plant oxidative stress: Biology, physiology, and mitigation. *Plants*, 11(9), 1185. <https://doi.org/10.3390/plants11091185>.
- Hong, S. H., Tripathi, B. N., Chung, M. S et al. (2018). Functional switching of ascorbate peroxidase 2 of rice (OsAPX2) between peroxidase and molecular chaperone. *Scientific Reports*, 8(1), 9171. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27459-1>.
- Hossain, M. A., Hoque, M. A., Burritt, D. J., & Fujita, M. (2014). Proline protects plants against abiotic oxidative stress: biochemical and molecular mechanisms. In *Oxidative damage to plants* (pp. 477-522). Academic press.

- Hosseini-fard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5186. <https://doi.org/10.3390/ijms23095186>
- Houasli, C., Nasserlhaq, N., Elboughmadi, K., Mahboub, S., Sripada, U. (2013). Effet du stress hydrique sur les critères physiologiques et biochimiques chez neuf génotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.). *Nature et Technologie. B- Sciences Agronomiques et Biologiques*, n° 11/Juin 2014. Pages 08 à 16.
- Hu, N., Du, C., Zhang, W., Liu, Y., Zhang, Y., Zhao, Z., Wang, Z. Did Wheat Breeding Simultaneously Improve Grain Yield and Quality of Wheat Cultivars Releasing over the Past 20 Years in China. *Agronomy* 2022, 12, 2109. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092109>.
- Hu, S., Ding, Y., & Zhu, C. (2020). Sensitivity and responses of chloroplasts to heat stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 375. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00375>.
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D. X., Yi, M., & Zhao, Y. (2019). Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses. *Frontiers in plant science*, 10, 800. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>.
- Huhn, M. (1990) Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. *Euphytica* 47:189–1990.
- Hussain, H. A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S. A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in plant science*, 9, 393. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393>.
- Hussain, S., Rao, M. J., Anjum, M. A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M. A., ... & Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. *Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches*, 207-219.
- Ibrahim, R.I.H., Alkhudairi, U.A., Alhusayni, S.A.S. (2022). Alleviation of Herbicide Toxicity in *Solanum lycopersicum* L.-An Antioxidant Stimulation Approach. *Plants* 2022, 11(17), 2261. <https://doi.org/10.3390/plants11172261>.
- Jallouli, S., Chamekh, Z., Ayadi, S., Zouari. et al (2022) Changes in yield and yield stability of durum wheat genotypes (*triticum turgidum* ssp. *Durum*) under different environments and water regimes. *Cereal Res Commun.* 50(3). 549-558. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00197-3>.
- Jian, H. J., Wang, T., Wang, L., Wei, J. Li and L. Liu. 2016. Identification of rapeseed microRNAs involved in early stage seed germination under salt and drought stresses. *Frontiers in Plant Science*, 7: 658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00658>.
- Jiang, T., Liu, J., Gao, Y., Sun, Z., Chen, S., Yao, N., ... & He, J. (2020). Simulation of plant height of winter wheat under soil Water stress using modified growth functions. *Agricultural Water Management*, 232, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106066>.
- Kadi, Z., Adjel, F., Bouzerzour, H. 2010. Analysis of the genotype x environment interaction of barley grain yield (*Hordeum vulgare* L.) under semi-arid conditions. *Adv. Environ. Biol.*, 4: 34-40
- Kadioglu, A., Terzi, R., Saruhan, N., & Saglam, A. (2012). Current advances in the investigation of leaf rolling caused by biotic and abiotic stress factors. *Plant Science*, 182, 42-48.
- Kara, K. (2015). Interactions génotype-milieu de variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous stress hydrique. Thèse de doctorat en sciences, Univ Des Frères Mentouri Constantine, 171p.
- Karabulut, F., and Çanakcı, S. (2021). Effects of Glyphosate Herbicide on Photosynthetic Pigments and Antioxidant Enzyme Activities in Corn (*Zea mays* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*. Volume 4, Issue 2 (2021) 61-66. <https://doi.org/10.54565/jphcfum.1004433>.

- Kardile, P.B., Dahatonde, K.N., Rakshe, M.V., and Burondkar, M.M. (2018). Effect of Moisture Stress on Leaf Relative Water Content (RWC) of Four Cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp.) Genotypes at Different Stages of Growth. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7 (04): 2645-2649. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.301>.
- Kaya, L.G., Çetin, M., and Doygun, H. (2015). A holistic approach in analyzing the landscape potential: Porsuk Dam Lake and its environs. Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(8), 1525-1533.
- Khalilzadeh, R., Sharifi, R., and Jalilian, J. (2016). Antioxidant status and physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to cycocel application and bio fertilizers under water limitation condition, *Journal of Plant Interactions*, 11:1, 130-137. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1221150>.
- Khan, S., Zhou, J. L., Ren, L., & Mojiri, A. (2020). Effects of glyphosate on germination, photosynthesis, and chloroplast morphology in tomato. *Chemosphere*, 258, 127350.
- Kirby, E.J.M., Appleyard, M., & Fellows, G. (1985). Effects of sowing date and varieties on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley plant. *Agronomie*, 5: 117-126.
- Kirouani, A., Boukhalfoun, L., Ouldkar, R., Bouzerzour, H. (2023) Analysis of the effect of GE interaction on the grain yield and its related traits in rain-fed Algerian durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grown in contrasting environments. *Rev Fac Nac Agron Medellín* 76(2). <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n2.102517>.
- Kirouani, A., Ouldkar, R., Boukhalfoun, L., Fellahi, Z. (2019). Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) par le biais des marqueurs phénotypiques. *Journal of Applied Biosciences* 142: 14464 – 14477. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v142i1.3>
- Kohila, S., and Gomathi, R. (2018). Adaptive physiological and biochemical response of sugarcane genotypes to high temperature stress. *Indian journal of Plant Physiology*. 2018; 23(2): 245–260. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0363-y>.
- KOURAT, T. (2021). Évaluation du changement climatique et impact sur la production du blé dur pluvial dans les Hautes plaines orientales de l'Algérie. 2021. Thèse de doctorat.
- Kronberg, M. F., Rossen, A., & Munarriz, E. R. (2021). Glyphosate-based herbicides and oxidative stress. In *Toxicology* (pp. 79-90). Academic Press.
- Kumar, V., Tyagi, BS., Verma, A., Sharma, I. (2014) Stability analysis for grain yield and its components under different moisture regimes in bread wheat (*Triticum aestivum*). *Indian J Agric Sci*. 84. 931-6. <https://doi.org/10.56093/ijas.v84i8.43066>.
- Laala, Z., Oulmi, A., Saraoui, T., Haddad, L., Nouar, H., Benmahammed, A., Bouzerzour, H. 2010. Effet de la sélection de la biomasse et des épis sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions Semi-arides. *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur (Univ Ouargla)*. 4 : 56-69.
- Lin, CS., Binns, MR., Lefkovitch, LP. (1986) Stability analysis: where do we stand? 1. *Crop Sci*, 26(5), 894-900. <https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600050012x>.
- Maamri, K. 2019. Modélisation de la productivité du blé dur en milieu semi-aride en utilisant le programme « Aqua-Crop ». Thèse de doctorat science. Département d'agronomie. Université Ferhat Abbas Sétif 1 - p
- Makhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A & Hadj Sahraoui, A., Harkati, N. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse* 2006, 17 (4): 507-13
- Malalgoda, M., Ohm, J.B, Howatt, K.A., Simsek, S. (2020). Pre-harvest glyphosate application and effects on wheat starch chemistry: Analysis from application to harvest. *Journal of Food Biochemistry J Food Biochem*. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13330>.
- Mansouri, A., Oudjehih, B., Benbelkacem, A., Fellahi, ZEA., Bouzerzour, H. (2018) 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. *Intl J of Agron.* <https://doi.org/10.1155/2018/8191749>.

Mao, H., Li S, Chen B, Jian C, Mei F, Zhang Y, Li F, Chen N, Li T, Du L, Ding L, Wang Z, Cheng X, Wang X, Kang Z. 2022. Variation in cis-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in wheat. *Molecular plant, Research Article*. Volume 15, Issue 2, Pages 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.11.007>.

Marcussen, T., Sandve, S.R., Heier, L., Spannagl, M., Pfeifer, M., Jakobsen, K.S., Wulff, B.B.H., Steuernagel, B., Mayer, K.F.X., et al (2014). Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat. *Science* 2014, 345, 1250092.

Martínez-Moreno, F., Ammar, K., Solís, I. (2022). Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: A historical review. *Agronomy* 2022, 12, 1135. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051135>.

Masoumi, A., Kafi, M., Khazaei, H., Davari, K. (2010). Effect of drought stress on water status, electrolyte leakage, and enzymatic antioxidants of kochia (*kochia scoparia*) under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany* 42(5): 3517-3524.

Mazibuko, P., Mutengwa, C., Magorokosho, C., Kutwayo, D., Kamutando, CN. (2024) Genetic Gains of Grain Yield among the Maize Cultivars Released over a Century from the National Breeding Program of Zimbabwe. *Agronomy*, 14(2), 246. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020246>.

Mazouz, L., Hamana, B. (2017). Etude de la contribution des paramètres phéno-morphologiques dans la sélection du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans le climat semi-aride. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 35: 45-58.

McGill, M. R., & Jaeschke, H. (2013). Oxidant stress, antioxidant defense, and liver injury. In *Drug-Induced Liver Disease* (pp. 71-84). Academic Press.

Mecha, B., Alamerew, S., Assefa, A (2017). Correlation and path coefficient studies of yield and yield associated traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Adv Plants AgricRes.* 2017;6(5):128-136. <https://doi.org/10.15406/apar.2017.06.00226>.

Meena, V. K., Shekhawat, H. V. S., Chand, S., Choudhary, K., Sharma, J. K., & Lekha, L. (2023). Advances in Molecular Marker Technology and Their Significance in Plant Improvement Strategies.

Mekaoussi, R., Rabti, A., Fellahi, Z., Hannachi, A., Benmahammed, A., bouzerzour, H. (2021). Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices. *Acta agriculturae Slovenica*. 117/2 – 2021. <https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.2.2021>.

Mekhlouf, A., Makhoulf, M., Bounechada, M. et al (2011) Impact des différents systèmes de cultures sur la culture de blé tendre (*Triticum aestivum*, L), var. HD 1220 en conditions semi-arid. *Agronomie*.

Messaoudi, N., Benderradji, L., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Brini, F. 2021. Agronomic and Morpho-Physiological Characterization of Some Advanced Lines being Selected in Durum Wheat Cultivated in Semi-Arid Conditions. *Food Science and Engineering*. <http://ojs.wiserpub.com/index.php/FSE/>

Migdal, C., & Serres, M. (2011). Espèces réactives de l'oxygène et stress oxydant. *médecine/sciences*, 27(4), 405-412. <https://doi.org/10.1051/medsci/2011274017>.

MirMohammadi Maibody, S.A.M. and Golkar, P., (2019). Application of DNA molecular markers in plant breeding. *Plant Genetic Researches*, 6(1), pp.1-30.

Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1110622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>

- Mohammadi, M., Sharifi, P., Karimizadeh, R. (2014). Stability Analysis of durum wheat genotypes by regression parameters in dryland conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelian Brunensis*. No 62(5). P 1049–1056. <https://doi.org/10.11118/actaun201462051049>.
- Mohammadi, R., Roostaei, M., Ansari, Y. et al (2010) Relationships of phenotypic stability measures for genotypes of three cereal crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 90(6), 819-830. <https://doi.org/10.4141/CJPS09102>.
- Mosa Kareem, A., Ismail, A. and Helmy, M. (2017). Introduction to Plant Stresses. In *Plant Stress Tolerance*, 1-19. Springer Briefs in Systems Biology.
- Muhammad Aslam, M., Waseem, M., Jakada, B. H et al. (2022). Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants. *International journal of molecular sciences*, 23(3), 1084.
- Mwadzingeni, L., Shimelis, H., Dube, E., Laing, M. D., Tsilo, T. J. 2016. Breeding wheat for drought tolerance: Progress and technologies. *J Integr Agric*, 15(5): 935-943.
- Mzabri, I., Charif, K., Legsayer, M., Kouddane, N., & Berrichi, A. (2017). Réponses morpho-phénologiques du safran (*Crocus sativus* L.) à deux stress abiotiques (hydrique et salin). *Journal of Applied Biosciences*, 117, 11651-11657.
- Nandini, Y and Sharma, S. (2016). Reactive oxygen species, oxidative stress and ROS scavenging system in plants." *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 8.5 (2016): 595-604.
- Nassar, R., and Huhn, M. (1987) Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics* 43: 45-53.
- Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H., Faruq, G. 2013. Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*: 610721. <https://doi.org/10.1155/2013/610721>.
- Nowosad, K., Liersch, A., Popławska, W., Bocianowski, J. (2016) Genotype by environment interaction for seed yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) using additive main effects and multiplicative interaction model. *Euphytica*, 208, 187-194. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1620-z>.
- Othmani, A., Sourour, A., Zoubair, C., & Ben Younes, M. (2021). Screening for PEG-induced drought stress tolerance in seedlings of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. *Pakistan Journal of Botany* 53(3), 823-832. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2021-3\(5\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2021-3(5))
- Oulmi, A., and Aissaoui, M.R. (2022). Canopy temperature and chlorophyll content as plant traits indicators for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) superior lines selection under semi-arid conditions. *Agricultural Science and Technology*, VOL. 14, (2), 114-122. <https://doi.org/10.15547/ast.2022.02.027>.
- 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.
- Pandey, S., Fartyal, D., Agarwal, A., Shukla, T., James, D., Kaul, T., ... & Reddy, M. K. (2017). Abiotic stress tolerance in plants: myriad roles of ascorbate peroxidase. *Frontiers in plant science*, 8, 215288. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00581>.
- Patel, J.M., Patel, A.S., Patel, C.R., Mamrutha, H.M., Sharma, P., & Karen, P. (2019). Evaluation of Selection Indices in Screening Durum Wheat Genotypes Combining Drought Tolerance and High Yield Potential. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* ISSN: 2319-7706 Volume 8.
- Plaisted, R.I., Peterson, L.C. (1959) A technique for evaluating the ability of selection to yield consistently in different locations or seasons. *Am Potato J*. 36:381–385.

- Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N., and Poczaï, P. 2020. Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability* 12(14): 5610. <https://doi.org/10.3390/su12145610>.
- Pour-Aboughadareh, A., Yousefian, M., Moradkhani, H., et al (2019) STABILITYSOFT: A new online program to calculate parametric and non-parametric stability statistics for crop traits. *Appl. Plant Sci.* 7(1): e1211. <https://doi.org/10.1002/aps3.1211>.
- Pourrut, B., Perchet, G., Silvestre, J., Cecchi, M., Guiesse, M., & Pinelli, E. (2008). Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of plant physiology*, 165(6), 571-579. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.07.016>.
- Pujer, S., Naik, VR., Biradar, SS., Uday, G. (2020) Stability analysis to study the effects of different date of sowing on grain yield performance in wheat (*Triticum* sp.). *Int J Curr Microbiol App Sci.* 9(5). 2343-2353. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.267>.
- Rabti, A. 2021. Changements des caractères morpho-physiologiques induits par la sélection artificielle du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en Algérie. Thèse de Doctorat en science. Université Ferhat Abbas Sétif 1. 128P.
- Racz, I., Kadar, R., Adrian, O. et al (2019) The grain yield performance and stability characters of several spring wheat genotypes in Transylvanian plain conditions. *Bull UASVM Agric.* 76. 1. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:2017.0045>.
- Ramadan, T., SayedS, A., Abd-ElalA, K.A., and Amro, A. (2022). The combined effect of water deficit stress and TiO₂ nanoparticles on the cell membrane and antioxidant enzymes in *Helianthus annuus* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 28 (2): 391– 409. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01115>.
- Ranieri, R. (2015). Geography of the durum wheat crop. *Pastaria International* 6/2015. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.
- RAOUDHA, A., Sayah, A., HASSEN, G et al. (2012). Extraction de l'adn et optimisation de la PCR (Polymorphism Chain Reaction) pour l'application des marqueurs RAPD (Random Amplified Polymorphism DNA) chez *Stipa lagascae*. *Acta botanica gallica*, 2012, vol. 159, no 1, p. 73-78.
- Rehman, S.U., Muhammad Bilal, A., Rashid, M.R., Muhammad, N.T., Muhammad, K., Nawaz, S., Habtamu, A., and Guijun, Y. (2016). Cell membrane stability and chlorophyll content variation in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under heat and drought conditions. *Crop and Pasture Science*. <https://doi.org/10.1071/CP15385>.
- Rejeb, M.N., Ben Salem, M. 1993. Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 22 : 49-52.
- Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Watt, M., Condon, A.G., Spielmeier W, Dolferus R (2010). *Functional Plant Biology* 37, 85–97. doi:10.1071/FP09219.
- Rivas-Garcia, T., Espinosa-Calderón, A., Hernández-Vázquez, B., and Schwentesius-Rindermann, R. (2022). Overview of Environmental and Health Effects Related to Glyphosate Usage. *Sustainability*, 14(11), 6868. <https://doi.org/10.3390/su14116868>.
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., Sabaghpour, SH. (2006) Nonparametric methods for interpreting G×E interaction of lentil genotypes. *CropSci.* 2006; 46: 1100–1106.
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277. <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>

- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277.
- Sahu, P. K., Jayalakshmi, K., Tilgam, J., Gupta, A., Nagaraju, Y., Kumar, A., ... & Rajawat, M. V. S. (2022). ROS generated from biotic stress: Effects on plants and alleviation by endophytic microbes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1042936. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042936>.
- Sahu, P. K., Jayalakshmi, K., Tilgam, J., Gupta, A., Nagaraju, Y., Kumar, A., ... & Rajawat, M. V. S. (2022). ROS generated from biotic stress: Effects on plants and alleviation by endophytic microbes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1042936. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042936>
- Sakya, A.T., Sulistyaningsih, E., Indradewa, D., and Purwanto, B.H. (2018). Physiological characters and tomato yield under drought stress. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 200 (2018) 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012043>.
- Sall, A.T., Chiari, T., Legesse, W., Ahmed, S., Ortiz, R., Vanginkel, M., & Bassu, F.M. (2019). Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) origin, cultivation, and potential expansion in sub-Saharan Africa. *Agronomy*, 9:263.
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F., Baenziger, P. S., & Börner, A. 2019. Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. *International journal of molecular sciences*, 20(13), 3137. <https://doi.org/10.3390/ijms20133137>.
- Salmi, M. (2015). Caractérisation morpho-physiologique et biochimique de quelques générations F2 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Thèse de Magister en agronomie. Spécialité Génétique et amélioration des plantes. Université Ferhat abas Sétif -1-p83.
- Salmi, M. (2020). Composantes génétiques de la variation de la tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress abiotique : Analyse des générations de base. Doctorat en science spécialité production végétale. Université Ferhat Abbes Sétif. P154.
- Schuhwerk, D. (2011). Field-screening of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) for drought tolerance. University of Natural Resources and Life Sciences- Vienna, page 5.
- Sebbane, M. (2021) Opportunités d'amélioration de la production de blé dur en zone à contrainte hydrique. Thèse doctorat LMD en science agronomique spécialité production végétale. 111 P.
- Shamsul, H., Kaiser, H., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Aqil, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant signaling and behavior*, 7(11), 1456-1466.
- Sharifi-Rad, M., Anil Kumar, N. V., Zucca, P., Varoni, E. M., Dini, L., Panzarini, E., ... & Sharifi-Rad, J. (2020). Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: Back and forth in the pathophysiology of chronic diseases. *Frontiers in physiology*, 11, 694.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>.
- Shrestha, J., Kushwaha, U. K. S., Maharjan, B., Kandel, M., Gurung, S. B., Poudel, A. P., ... & Acharya, R. (2020). Grain yield stability of rice genotypes. *Indonesian Journal of Agricultural Research*, 3(2), 116-126.
- Shukla, G.K. (1972) Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity*. 29: 237-245.
- Siddique, K.H.M., Kirby, E.J.M. & Perry, M.W. 1989. Ear to stem ratio in old and modern wheats: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.* 21, 59–78
- Silva, K.S., Urban, L.J. K., Balbinota, A., Gnoco, F.S., KRUSE, N.D., Marchesan, E., and Machado, S.L.O. (2016). Electrolyte Leakage and the Protective Effect of Nitric Oxide On Leaves Of Flooded Rice Exposed To

- Herbicides. *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v. 34, n. 4, p. 777-785, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582016340400018>.
- Singh, S.K, Kumar, J. P., Kaur G.S., Datta, S., Singh, V., Dhaka, D., Kapoor, A.B., Wani, D. S., Dhanjal, M., Kumar, L., Harikumar, and J. Singh. (2020). Herbicide Glyphosate: Toxicity and Microbial Degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20): 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>.
- Singh, S.K., Barman, M., Prasad J.P., Bahuguna. R.N. (2022). Phenotyping diverse wheat genotypes under terminal heat stress reveal canopy temperature as critical determinant of grain yield. *Plant Physiology Reports* 2022, 27, 335-344.. <https://doi.org/10.1007/s40502-022-00647-y>
- Slama, A., Mallek-Maalej, E., Ben Mohamed, H., Rhim, T., Radhouane, L. (2018). A return to the genetic heritage of durum wheat to cope with drought heightened by climate change. *PLoS ONE*13(5): e0196873. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196873>.
- Soares, C., Pereira, R., Spormann, S., Fidalgo, F. (2019). Is soil contamination by a glyphosate commercial formulation truly harmless to non-target plants - evaluation of oxidative damage and antioxidant responses in tomato *environmental pollution* Environ. Pollut. 247, 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.063>.
- Spagnoletti Zeuli, P. L., Qualset, C. O. Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breeding* 105.3 (1990): 189-202. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1990.tb01196.x>
- Spormann, S., Nadais, P., Sousa, F., Pinto, M., Martins, M., Sousa, B., ... & Soares, C. (2023). Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils—Are We on the Same Page. *Antioxidants*, 12(3), 666.
- Steliana, P.B., Aurel, G., Daniel, C., and Călina, P.C. (2018). The Influence of Climatic Variations on the Stability of Wheat Plant Height. *Sciend*, 508–514 <https://dx.doi.org/110.2478/alife-2018-0080>.
- Tan, S., Sha, Y., Sun, L., & Li, Z. (2023). Abiotic stress-induced leaf senescence: regulatory mechanisms and application. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 11996.
- Taverna Porro, M. L., & Greenberg, M. M. (2015). Double-strand breaks from a radical commonly produced by DNA-damaging agents. *Chemical research in toxicology*, 28(4), 810-816.
- Tedone, L., Ali, S.A., De Mastro, G. (2017) Optimization of nitrogen in durum wheat in the Mediterranean climate: The agronomical aspect and greenhouse gas (GHG) emissions. *N Agric-updates*. 8. 131-162. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70195>.
- Thakur, K., & Garg, N. (2022). *Oxidative Stress and Antioxidant Enzymes in Cereals Under Abiotic Stress. In Sustainable Remedies for Abiotic Stress in Cereals* (pp. 51-82). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Thakur, V., Rane, J., Nankar, A.N. (2022). Comparative Analysis of Canopy Cooling in Wheat under High Temperature and Drought Stress. *Agronomy* 2022, 12(4), 978. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040978>.
- Thapa, S., Kirk, E.J., Gautam, P.P., Jackie, C.R., Shuyu, L., James, R.M., Ravindra, N.D., Jason, A.B., Qingwu, X. (2018). Canopy temperature depression at grain filling correlates to winter wheat yield in the U.S. Southern High Plains. *Field Crops Research*, Elsevier. V 217, March 2018, P 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.005>.
- Thennarasu. (1995). On certain non-parametric procedures for studying genotype-environment interactions and yield stability. PhD thesis. PJ School. Indian Agricultural Research Institute. New Delhi. India.
- Tshikunde, N.M., Mashilo, J., Shimelis, H and Odindo, A. (2019) Agronomic and Physiological Traits, and Associated Quantitative Trait Loci (QTL) Affecting Yield Response in Wheat (*Triticum aestivum* L.): A Review. *Front. Plant Sci.* 10:1428. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01428>.
- Tumová, L., Tarkowská, D., Řeřová, K., Marková, H., Kořcová, M., Rothová, O., Čechetka, P.; Holá, D. (2018). Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Genotypes of Maize (*Zea mays* L.) Differ in Contents of Endogenous Brassinosteroids and Their Drought-Induced Changes. *PLoS ONE* 2018, 13, e0197870

- Ullah, M. I., Mahpara, S., Bibi, R., Shah, R. U., Ullah, R., Abbas, S., ... & Khan, M. I. (2021). Grain yield and correlated traits of bread wheat lines: Implications for yield improvement. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5714-5719. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.006>.
- Wach, D., & Skowron, P. (2022). An overview of plant responses to drought stress at morphological, physiological and biochemical levels. *Polish Journal of Agronomy*, (50), 25-34.
- Wolde, G.W., Mascher, M., and Schnurbusch, T. (2019). Genetic modification of spikelet arrangement in wheat increases grain number without significantly affecting grain weight. *Molecular Genetics and Genomics* volume 294, pages 457–468. <http://dx.doi.org/10.1007/s00438-018-1523-5>.
- Wricke, G. (1962) Übereine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, 47: 92-96.
- Xiao, YG., Qian, ZG., Wu, K. et al (2012) Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. *Crop Sci* 52: 44– 56. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.05.0246>.
- Xynias, I.N.; Mylonas, I.; Korpetis, E.G et al. (2020). Durum wheat breeding in the Mediterranean region: Current status and future prospects. *Agronomy* 2020, 10, 432. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030432>.
- Yang, B., Wen, X., Wen, H., Feng, Y., Zhao, J., Wu, B., Zheng, X., Yang, C., Yang, S., Qiao, L., and Zheng, J. (2022). Identification and validation of quantitative trait loci for chlorophyll content of flag leaf in wheat under different phosphorus treatments. *Frontiers plant science*. Volume 13 – 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019012>.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50.
- Younus, H. (2018). Therapeutic potentials of superoxide dismutase. *International journal of health sciences*, 12(3), 88.
- Zhu, M., Li F.H., Shi, Z.S. (2016). Morphological and photosynthetic response of waxy corn inbred line to waterlogging. *Photosynthetica*. 2016; 54:636-640. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0203-0>.
- Zobiolo, L.H.S., Kremer, R.J., Oliveira, J.R.S., Constantin, J., Oliveira RS. (2011). Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of “second generation” glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). *Pesticide Biochemistry and Physiology* 99, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.10.005>.

Assessment of agro-physiological traits for identifying drought-tolerant durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under rainfed conditions

Evaluación de rasgos agrofisiológicos para la identificación de genotipos de trigo duro (*Triticum durum* Desf.) tolerantes a la sequía en condiciones de secano

<https://doi.org/10.15446/rfnam.v77n2.108152>

Sarah Benkadjia^{1*}, Abdelmalek Oulmi², Ali Guendouz³ and Benalia Frih²

ABSTRACT

Keywords:

Grain yield
Genotype
Semi-arid
Water
Performance

Breeders are focused on developing high-yielding genotypes that can grow in semi-arid regions under water stress. A field experiment was conducted during the 2020 to 2021 cropping season at the experimental field of ITGC, Setif. The aim of this study was to assess the performance of durum wheat genotypes for agronomic traits growing under semi-arid conditions. The 10 genotypes evaluated were grown in a randomized block with three replications. Analysis of variance showed that the genotype effect was significant for most parameters studied. The best grain yield was recorded for genotypes G3 (3.52 t ha⁻¹), G2 (3.48 t ha⁻¹), and G5 (2.89 t ha⁻¹); thus, they maintained the highest water content (81.09, 84.95, and 84.34%, respectively) and lower temperatures under these conditions. Simple linear regression showed that grain yield correlated positively with the number of spikes, and the number of grains per spike. The principal component (PC) analysis classified both genotypes G2 and G3 as high grain-yielding genotypes; by contrast, genotypes Jupare C 2001, Bouatleb, and G1 were low-yielding.

RESUMEN

Palabras clave:

Rendimiento de grano
Genotipo
Semiárido
Agua
Desempeño

Los mejoradores se centran en desarrollar genotipos de alto rendimiento que puedan crecer en regiones semiáridas sometidas a estrés hídrico. Se realizó un experimento de campo durante la temporada agrícola de 2020 a 2021 en el campo experimental del ITGC, Sétif. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de los genotipos de trigo duro en cuanto a características agronómicas en condiciones semiáridas. Los 10 genotipos evaluados fueron cultivados en bloques al azar con tres repeticiones. El análisis de varianza mostró que el efecto del genotipo fue significativo para la mayoría de los parámetros estudiados. El mejor rendimiento de grano se registró para los genotipos G3 (3,52 t ha⁻¹), G2 (3,48 t ha⁻¹) y G5 (2,89 t ha⁻¹); así mantuvieron el mayor contenido de agua (81,09; 84,95 y 84,34%, respectivamente) y temperaturas más bajas en estas condiciones. La regresión lineal simple mostró que el rendimiento de grano se correlacionaba positivamente con el número de espigas y el número de granos por espiga. El análisis de componentes principales (PC) clasificó ambos genotipos G2 y G3 como genotipos de alto rendimiento de grano; por el contrario, los genotipos Jupare C 2001, Bouatleb y G1 fueron de bajo rendimiento.

¹Department of Agronomy, VRBN Laboratory, faculty of Nature and Life Sciences, Farhat Abbas University of setif, Algeria. Sarahbenkadjia8@gmail.com 

²Department of Biology and Plant ecology, VRBN Laboratory, faculty of Nature and Life Sciences, Farhat Abbas University of setif, Algeria. oulmi@yahoo.fr , benaliafrih@gmail.com 

³National Institute of Agronomic Research of Algeria, Research Unit of Setif (INRAA), Algeria. guendouz.ali@gmail.com 

*Corresponding author

Cereal cultivation is an ancient activity in the Algerian agricultural environment, practiced in all regions, including the Saharan zone, with a predominance of durum wheat cultivation (Chourghal et al. 2023). Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) is an important cereal species and is cultivated worldwide over almost 17 million hectares (Xynias et al. 2020). It is a central crop grown in Algeria, and its production is based on the adoption of modern varieties derived from plant material from CIMMYT (the International Center for the Improvement of Maize and Wheat), ICARDA (the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), and traditional cultivars derived from local heritage varieties. Though durum wheat production covers only 24 to 55% of the country's annual consumption (ITGC 2022; Djoudi et al. 2024), it is insufficient to meet the country's needs, estimated at 8.5 million metric tons per year (Hannachi and Fellahi 2023). This low production is often explained by unpredictable weather, long dry seasons, inconsistent rainfall, and soils that are poor in nutrients, which especially characterize the semi-arid regions (Krishnamurthy et al. 2011). Thus, Hussain et al. (2019) stated that several abiotic stresses, such as drought, chilling, high temperature, and salinity, are strongly affecting plant growth, development, and yield. Indeed, drought is one of the most important abiotic factors that reduces yield under rainfed conditions. Durum wheat varieties grown in a dry area must be able to tolerate water and thermal stress to improve their grain yield potential (Mekaoussi et al. 2021). According to Bendjama and Ramdani (2021), water stress is the main constraint, reducing yield and potential production. Mamrutha et al. (2022) mentioned drought as one of the critical factors that reduce wheat yield at the worldwide level. It can occur at each stage of plant growth and induce a series of morphological, physiological, biochemical, and molecular changes in plants (Bendada 2021). Drought also negatively affects relative water content, gas exchange, and chlorophyll content (Othmani et al. 2021). They also observed that drought stress reduced stomatal conductance, which results in increased leaf temperature by limiting transpiration (Melandri et al. 2020). Further, Bali and Sidhu (2019) cited that relative leaf water content is the primary factor that decreased the growth of wheat in response to drought stress. Drought not only reduced water content but also chlorophyll content (Keyvan 2010). The stress effect depends on its degree, duration, and stage of development. During the early

stages of growth, stress involves multiple morphological and physiological alterations during germination (Jian et al. 2016). While, during flowering and grain-filling periods, drought can decrease the number of fertile tillers, ear fertility, grain weight, and aboveground biomass (Pour-Aboughadareh et al. 2020). Improving grain yield has been a primary goal of most breeding programs. Then, developing drought-tolerant cultivars with high grain yields has been the principal goal of wheat breeders (Mohammadi et al. 2014; Mao et al. 2022). Various physiological traits, such as relative water content, electrolyte leakage, chlorophyll content, and canopy temperature, have been used to select desirable genotypes with high yield and stress tolerance. Likewise, the selection of genotypes using yield is assisted by morphological and physiological characteristics related to yield under drought conditions (González-Ribot et al. 2017). This research was conducted to assess the variability of 10 durum wheat genotypes in response to drought conditions based on agro-physiological traits and to select desirable genotypes under these conditions.

MATERIALS AND METHODS

Site, Plant materials and Experiment design

The experiment was carried out at the experimental site of the Technical Institute of Field Crops (ITGC) of Setif 36°09' N; 05°22' E; 981 meters above sea level (masl) during the 2021 to 2022 agricultural season. The experiment was set up on 14th December 2022, in a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Each plot consisted of six lines 5 m long, spaced 0.2 m apart, which made up 6 m² of plot dimension. The plant materials used consisted of ten durum wheat genotypes shown in (Table 1).

The soil is calcareous (Calcisol) with a silty clay texture, and organic matter content is 1.4% on the surface. The amount of monthly rainfall, temperature (min, max, mean) are presented in (Table 2).

Physiological traits

The chlorophyll content index (CCI) of each flag leaf was measured using a digital Chlorophyll Content Meter Model CCM-200 Plus. The relative water content (RWC) was determined at the heading stage according to Pask et al. (2012) method, five fresh leaves were weighted to record fresh mass (FM). The leaves were placed in distilled water for 24 h and weighed to get a turgid

Table 1. The pedigrees of the genotypes tested.

Genotypes	Pedigrees
G1	RASCON_37/GREEN_2/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/...
G2	MINIMUS_6/PLATA_16//IMMER/3/SOOTY_9/RASCON_37/9/...
G3	CMH77.774/CORM//SOOTY-9/RASCON-37/3/SOMAT-4
G4	CNDO/PRIMADUR//HAI-OU-17/3/SNITAN/4/SOMAT-3/
G5	CNDO/VEE//CELTA/3/PATA_2/6/ARAM_7//CREX/ALLA/5/ENTE/...
G6	SILVER 14/MOEWE//BISU_I/PATKA_3/3/PORRON_4/YUAN_I/9/...
Jupare C 2001	STINKPOT//ALTAR-84/ALONDRA
Bousselam	Heider/Martes/Huevos de Oro. ICD-414
Boutaleb	GTA dur /Ofanto
Oued El Bared	Hedba3/Ofanto

Table 2. The climatic characteristics of the 2021–2022 agricultural season.

Month	Rainfall (mm)	Temperature (°C)		
		Max	Min	Mean
September	41.42	30.1	17.5	23.8
October	8.13	20.6	9.1	14.7
November	84.6	11.9	5	8.5
December	21.1	12	1.5	6.4
January	10.91	10.4	-1.4	4.3
February	28.69	13.6	1	7.2
March	46.98	12.8	4.4	8.6
April	82.29	17.2	5.9	11.7
May	6.09	25	10.5	17.8
June	0.25	35.3	18.2	27.1

mass (TM). Samples were oven-dried at 65 °C for 24 h to record dry mass (DM). Relative water content was calculated as follows the equation 1.

$$RWC = \frac{(FM - DM)}{(TM - DM)} \times 100 \quad (1)$$

The relative electrolyte leakage (REL%) of leaf tissues was measured using the method developed by Bajji et al. (2001), two leaves were collected, washed with tap water then with distilled water, and cut into 1 cm length segments. The samples were placed in tubes with 10 mL of distilled water and incubated for 24 h at room temperature in the laboratory. Subsequently, the first reading (EC1) was carried out. The final conductivity (EC2) was measured after placing tubes in a boiling water bath at 100 °C for 1 h.

The relative electrolyte leakage (REL%) was calculated as follows the equation 2.

$$REL(\%) = \frac{EC1}{EC2} \times 100 \quad (2)$$

The Canopy temperature (CT) measurements were taken on a sunny day using a portable infrared thermometer (Fluke Corporation. Everett.WA. USA). Readings were taken on sunny days between 11:00 to 14:00 hours.

Flag leaf area (FLA) was determined according to Spagnoletti-Zeuli and Qualset (1990). Five fresh leaves were collected, Leaf length (L) and wide (I) were measured and the area was calculated as follows the equation 3.

$$FLA (cm^2) = 0.607 (L \times I) \quad (3)$$

Agronomic traits

At maturity, data were collected on grain yield (GY) (t ha^{-1}), thousand kernel weight (TKW, g), number of spikes per m^2 (NSm^{-2} , spike), and number of grains per spike (NGS, grain).

Statistical analysis

An analysis of variance was performed for a measured trait at the 5% probability level to test the differences among genotypes, and the linear correlations were done to study the different associations among variables using Costat software (6.400, 1998). A principal component analysis (PCA) was done using the R Core Team.

RESULTS AND DISCUSSION

Physiological variation among genotypes

Crop yield is mainly dependent on the different biochemical and physiological traits of genotypes, as well as the impact of environmental conditions. The results of the variance analysis showed significant differences among genotypes tested for all physiological parameters (Table 3). The differences between the physiological traits of genotypes depend on the distribution of genetics and environmental conditions.

The mean chlorophyll content index was significantly higher in variety Boutaleb (51.3 cci), while it was significantly the lowest in genotype G5 (32.6 cci) with an overall mean of 42.83 cci. Leaf chlorophyll content is a major indicator of the photosynthetic ability of plant tissues. It can directly regulate the photosynthetic rate and reflect photosynthetic potential and primary production (Liu et al. 2015). The change in chlorophyll contents is a useful indicator to evaluate the influence of environmental stress on plant growth and yield (Kohila and Gomathi 2018). Thus, several studies reported that the amount of chlorophyll in flag leaves was significantly affected by many environmental factors (Kaya et al. 2015; Atar et al. 2020). According to Yang et al. (2022), genotypes tolerant to various stresses display higher chlorophyll content and thus maintain stronger photosynthetic efficiency. It was also reported that stay-green bread genotypes have also shown higher grain yield and total biomass in field conditions (Del Pozo et al. 2016). Also, the study of Mansouri et al. (2018) proved that drought conditions accelerate chlorophyll degradation, reducing leaf area and photosynthesis; thus, genotypes that stay green with delayed senescence can

improve their performance under drought conditions. Naveed et al. (2014) mentioned that wheat genotypes were negatively influenced by severe drought stress at several growth stages, which reduced CO_2 assimilation, stomatal conductance, transpiration rate, and chlorophyll content and later inhibited grain yield at both tillering and flowering stages. Besides, the flag leaf area played an important role in improving the grain yield of wheat. The mean values were changed from 18.85 (G2) to 26.74 (G5), with an average of 22.74 cm^2 . The flag leaf area is a very important metric for assessing crop growth and is closely related to above-ground biomass and yield (Singh et al. 2023). Larger flag leaf sizes tend to produce more grain per spike in wheat (Tshikunde et al. 2019) and barley (Alqudah and Thorsten 2015). Guendouz et al. (2016) stated that water stress greatly reduces leaf area; it may also decrease turgor pressure and cell expansion, which result in approximately the same dry mass being contained within a smaller leaf area thus raising density.

The minimum, maximum, and average values for relative water content were 70.19% (Oued El Bared), 91.24% (G4), and 82.82%, respectively. The relative water content of flag leaves is often used to assess the response of a plant to stress; it is a reliable index of leaf water deficit status at the time of sampling (Kohila and Gomathi 2018). Optimal plant water status is important for maintaining normal cell activity under water stress conditions (Mamrutha et al. 2022); thus, genotypes that maintain a higher relative water content, ensuring better hydration and more favorable internal water, showed better drought tolerance capacity (Kardile et al. 2018). In addition, the finding of Bayoumi et al. (2015) stated that wheat genotypes that maintained higher relative water content under stress conditions were supposed to be drought-tolerant and show high grain yield. Thus, Bali and Sidhu (2019) mentioned that reduced leaf water potential and relative water content about increased drought stress. Recently, Chaouachi et al. (2023) mentioned that under water stress, plant species lose water mostly through transpiration, and then they tend to control their stomatal closure. Indeed, plants that can maintain relative water content under water stress are the most resistant.

The main relative electrolyte leakage was significantly higher in G3 (90.93%), which was the sensitive one, though genotype variety Oued El Bared was the most susceptible

one with the lowest value (48.34%). The measurement of electrolyte leakage was considered a typical criterion to assess membrane integrity in response to environmental stresses (Slama et al. 2018). According to Chowdhury et al. (2017), maintaining the integrity and stability of membranes under water stress is a major element of drought resistance in plants. Indeed, membrane protection ensures cellular structures remain intact, enabling plants to ensure their survival and productivity in various environmental conditions. Ramadan et al. (2022) stated that relative electrolyte leakage increased

with increasing levels of water deficit. Cell membrane stability is considered a possible selection criterion for grain yield since it has a reasonable relationship with plant performance under stressed environments (Anzer et al. 2017). Similarly, the finding of Rehman et al. (2016) described that wheat genotypes with high cell membrane stability produced a high grain yield. According to the results of Slama et al. (2018), increased electrolyte leakage under stress conditions is attributed to the disturbance of cell membranes, which probably induces protein degradation.

Table 3. Means values, maximum and minimum and statistical significance of physiological traits measured.

Genotypes	CCI (cci units)	FLA (cm ²)	RWC (%)	REL (%)	CT (° C)
G1	50.03 ^a	21 ^d	86.41 ^{ab}	71.36 ^{cd}	26.33 ^{abc}
G2	39.40 ^d	18.85 ^e	81.09 ^b	84.48 ^{abc}	22 ^d
G3	42.70 ^c	26.74 ^a	84.05 ^{ab}	90.93 ^a	22.43 ^{cd}
G4	43.26 ^c	20.93 ^d	91.24 ^a	70.29 ^d	24.96 ^{bcd}
G5	32.36 ^e	26.63 ^a	84.34 ^{ab}	88.50 ^{ab}	24.63 ^{bcd}
G6	46.40 ^b	21.08 ^d	81.07 ^b	76.03 ^{bcd}	25.76 ^{bcd}
Jupare c 2001	51.20 ^a	22.43 ^{cd}	88.35 ^{ab}	79.60 ^{abcd}	25.66 ^{bcd}
Boussalem	37.26 ^d	24.08 ^b	81.73 ^{ab}	85.60 ^{ab}	27.46 ^{ab}
Boutaleb	51.30 ^a	22.20 ^{cd}	79.69 ^{bc}	85.47 ^{ab}	30.33 ^a
Oued El Bared	34.43 ^e	23.23 ^{bc}	70.19 ^c	48.34 ^e	26.20 ^{abcd}
Mean	42.83	22.72	82.82	78.06	25.58
Max	51.30	26.74	91.24	90.93	30.33
Min	32.36	18.85	70.19	48.34	22
Genotype Effect	***	***	*	***	*
LSD5 (%)	2.64	1.62	9.81	13.56	4.30

CCI: Chlorophyll content index; **RWC (%)**: Relative water content; **REL (%)**: Relative electrolyte leakage; **CT (° C)**: Canopy temperature, **FLA (cm²)**: flag leaf area. ns, *, **, and *** non-significant, significant and highly significant effects at 5, 1, and 0.1% probability respectively.

The mean canopy temperature was significantly higher in both genotypes G2 and G3 with 22 and 22.43 °C, respectively while it was significantly the lowest in the variety Boutaleb (30.33 °C). Canopy temperature is an indirect measure of transpiration rate and stomatal conductance that may be useful in determining genotypic differences in drought response (Guendouz et al. 2021). This indicator is associated with plant water stress since the evaporative cooling involved in transpiration may cool leaves under ambient air temperature (Bazzaz et al. 2015). Wheat genotypes that have a cooler canopy during the heading stage and grain filling in the same environment can be an important indication of drought

stress tolerance (Thapa et al. 2018). Canopy temperature was used by Singh et al. (2022) as an important screening criterion to identify potential heat-tolerant genotypes along with a heat susceptibility index based on grain below optimum and stress environments. Sohail et al. (2020) revealed that genotypes maintain a low canopy temperature under rainfall conditions due to their ability to extract water through a better root system and greater stomatal conductance. According to the results of Bazzaz et al. (2015), in water stress conditions, the foliar temperature of wheat genotypes increased due to an increase in breathing and a decrease in transpiration. Also, it was noticed that plants with a suitable supply of

water maintained their canopy temperature below the air temperature, while plants with an insufficient supply of water showed a canopy temperature above the air temperature.

Agronomic traits for the assessed durum wheat genotypes

Numerous agronomic characters that have been widely explored in wheat improvement programs influence grain yield. The data presented in Table 4 shows the genotype effect was significant for grain yield and the number of spikes per m². The highest-yielding genotypes were G3, G2, and G5 (3.52, 3.48, and 2.89 t ha⁻¹, respectively), with an overall mean of 2.54 t ha⁻¹. For thousand kernel weight was significantly higher in Boutaleb, G2, and G4 (34, 32.72, and 31.8 g, respectively) though it was significantly lowest in genotype Jupare C 2001 (28.4 g). The number of spikes for the genotypes evaluated was recorded from 320 to 556.66 spikes per m²; the genotype G2 recorded the highest value, while the genotypes G1, G3, G4, and G5 exhibited the lowest values with 346.66, 358.33, 346.66, and 320 spikes. The mean values for NG/S varied from 21 grains for the introduced genotype

Jupare C 2001 to 43 grains for genotype G5, with a mean of 30.48 grains overall for all genotypes. Grain yield is a complex characteristic determined by three components: the number of spikes per area, grain number per spike, and grain weight. MajidiMehri et al. (2024) stated that water stress is a crucial environmental factor that decreases grain yield in bread wheat. Liu et al. (2015) proved that durum wheat genotypes were better adapted to water deficits and were able to maintain their grain numbers in unfavorable environments, which contributed to a smaller decrease in grain yield. Under stressful conditions in arid and semi-arid regions, the major purpose of wheat breeding programs is to develop durum wheat cultivars with high grain yields. It has been reported that wheat yield improvements are principally due to increases in grain weight and grain number per spike (Feng et al. 2018; Hu et al. 2022). Nouri et al. (2011) mentioned that the relative yield performance of genotypes in drought-stressed and favorable conditions helps to select the desirable genotypes. Hence, the development of high-yielding genotypes with acceptable stability and adaptability is a suitable method for improving durum wheat yield in drought conditions (Pour-Aboughadareh et al. 2020).

Table 4. Means values, maximum and minimum and statistical significance of agronomic characters measured.

Genotypes	GY (t ha ⁻¹)	TKW (g)	NS m ² (spike)	NG S ⁻¹ (grain)
G1	2.18 ^{bc}	29.40 ^{ab}	346.66 ^b	29 ^{bcd}
G2	3.48 ^a	32.73 ^{ab}	556.66 ^a	26.66 ^{cd}
G3	3.52 ^a	29.03 ^{ab}	358.33 ^b	35 ^{abc}
G4	2.23 ^{bc}	31.80 ^{ab}	346.66 ^b	30.66 ^{bcd}
G5	2.89 ^{ab}	30.22 ^{ab}	320 ^b	43 ^a
G6	2.46 ^{bc}	29.14 ^{ab}	448.33 ^{ab}	38 ^{ab}
Jupare c 2001	2.28 ^{bc}	28.40 ^b	400 ^{ab}	21 ^d
Boussalem	2.74 ^{ab}	29.60 ^{ab}	553.33 ^a	28.66 ^{bcd}
Boutaleb	1.73 ^c	34 ^a	376.66 ^b	24.66 ^{cd}
Oued El Bared	1.85 ^c	30.40 ^{ab}	451.66 ^{ab}	29.66 ^{bcd}
Mean	2.54	30.47	415.83	30.48
Max	3.52	34	556.66	43
Min	1.73	28.4	320	21
Genotype Effect	**	ns	ns	*
LSD5 (%)	0.86	5.17	173.78	13.87

GY (t ha⁻¹): Grain yield; **TKW (g):** Thousand-kernel weight; **NS m² (spike):** Number of spikes; **NG S⁻¹ (grains):** Number of grains per spike. Ns; *, **, non-significant, significant, and highly significant effects at 5, 1, and 0.1% probability respectively.

Correlation among assessed traits

Table 5 shows the correlations between different traits and grain yield. Grain yield had positive and significant correlation with number of grains per spike (0.43*) and a non-significant association with number of spikes NS (0.27^{ns}). Fellahi et al. (2019) supports this finding, and several researchers agree, suggesting that higher numbers of grains per spike and number of spikelets increase grain yield (Würschum et al. 2018; Wolde et al. 2019). The number of kernels per spike has been suggested as a useful trait for improving wheat grain yield, especially under drought conditions (Bogale and Tesfaye 2016). By contrast, the findings of Iqbal et al. (2017) revealed a non-significant relationship with these traits. Grain yield also had a significant positive correlation with thousand kernel weights ($r=0.44$ ns), while the study of Ullah et al. (2021) suggested a significant association between grain yield and thousand kernel weights. On the other hand, Boudersa et al. (2021) suggested that all yield components, such as grain weight, number of grains per spike, and biomass, have a considerable contribution to grain yield and that any direct or indirect disturbance affecting any of the yield components inevitably affects the grain yield. Hence, grain

yield improvement has been significantly associated with increased thousand-kernel weight; it expresses the grain size and considerably enhances the final yield of wheat (Iqbal et al. 2015). Ullah et al. (2021) conclude that for bread wheat, increased grain weight directly contributed to improved grain yield. Canopy temperature showed significant negative relationships with grain yield; Singh et al. (2022) stated similar findings. Low canopy temperatures in durum wheat lines were associated with higher grain yields (Sohail et al. 2020). Furthermore, Oulmi et al. (2020) noticed that a high canopy temperature causes a decrease in grain yield. Chlorophyll content did not correlate significantly with grain yield while showing a negative correlation with the number of grains per spike ($r=-0.38$). Similar findings were reported by Mohammadi et al. (2018). The flag leaf area exhibited a significant relationship with the number of grains per spike ($r=0.43^*$) and chlorophyll content ($r=-0.37^*$). This result agrees with the findings of Nor et al. (2015), who found that leaf area showed a significant positive correlation with the number of grains per spike. Wang et al. (2022) also stated similar results and observed that wheat genotypes with a larger flag leaf tend to produce more kernels per spike.

Table 5. Correlations among different traits measured.

Traits	CCI	RWC	REL (%)	FLA	CT	GY	TKW	NS	NG S ⁻¹
CCI	1	-	-	-	-	-	-	-	-
RWC	0.31 ^{ns}	1	-	-	-	-	-	-	-
REL	0.12 ^{ns}	0.14 ^{ns}	1	-	-	-	-	-	-
FLA	-0.37*	-0.09 ^{ns}	0.26 ^{ns}	1	-	-	-	-	-
CT	0.31 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	0.18 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	1	-	-	-	-
GY	-0.26 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.22 ^{ns}	-0.47**	1	-	-	-
TKW	-0.26 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.26 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	0.44 ^{ns}	1	-	-
NS	-0.26 ^{ns}	-0.43 ^{ns}	-0.025 ^{ns}	-0.37 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.33 ^{ns}	1	-
NG S ⁻¹	-0.38*	0.02 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.43*	-0.1 ^{ns}	0.43*	-0.1 ^{ns}	0.1 ^{ns}	1

CCI: Chlorophyll content index; **RWC (%)**: Relative water content; **REL (%)**: Relative electrolyte leakage; **CT (° C)**: Canopy temperature; **FLA (cm²)**: Flag leaf area; **GY (t ha⁻¹)**: Grain yield; **TKW (g)**: Thousand-kernel weight; **NS m⁻² (spike)**: Number of spikes; **NG S⁻¹ (grains)**: Number of grains per spike.

Principal component analysis

The principal component analysis (PCA), one of the methods of multivariate analysis, elucidates among a set of traits which ones are decisive in genotypic differentiation and selection (Ara et al. 2018). The data shown in Table 6 revealed that three components exhibited an eigenvalue near or higher than one. These three PCs accounted for

72.36% of the total variation. Furthermore, an increase in the number of PCs was correlated with a decrease in Eigenvalues. Based on the results shown in Figure 1, PC1 was highly correlated with grain yield and thousand kernel weights. genotypes G2 and G3 were positively correlated with PC1, suggesting that they had high productivity. While genotypes Jupare C 2001, Bouatleb, and G1 were

negatively correlated with PC1, which was described as a low-yielding genotype, this result is in accordance with the previous results of Frih et al. (2021) and Guendouz et al. (2021), who stated that grain yield and thousand kernel weights were associated with the two first components. The second component was a physiological axis, with relative electrolyte leakage and relative water content as the major contributors. The genotype G4 was positively

connected with this axis and consequently was classified as a drought-tolerant line. By contract varieties, Oued El Bared and Boussalem were negatively correlated with this axis, suggesting that they were the most susceptible to drought conditions. PC3 was negatively connected with flag leaf area; both genotypes G5 and G6 were negatively associated with this axis, which was characterized by a large flag leaf area.

Table 6. Eigenvalues, % proportion variance and % cumulative variance of three first components.

	PC1	PC2	PC3
Variance	2.849	2.026	1.638
% of variance	31.65	22.51	18.20
Cumulative	31.65	54.16	72.36

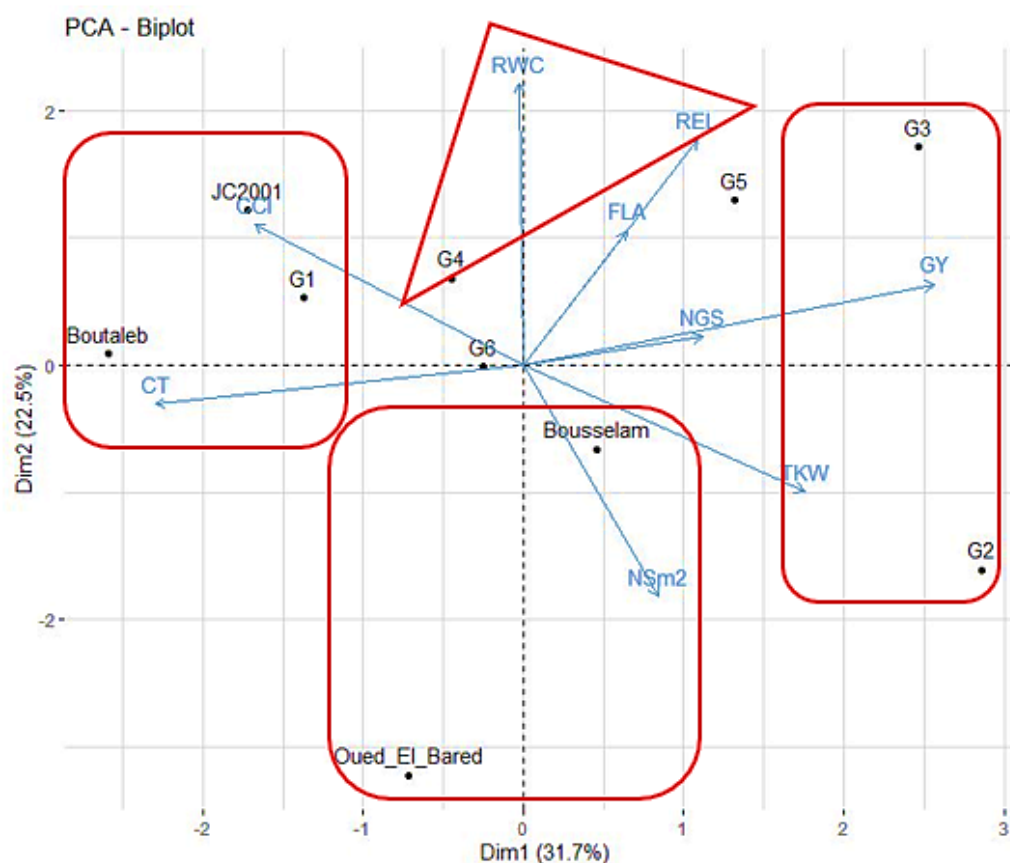


Figure 1. Biplot of genotypes and measured parameters with the first three components of PCA.

CONCLUSION

Drought is one of the most important abiotic stresses that reduce grain yield in rainfed regions. This study allowed the evaluation of the different durum wheat genotypes based on their agro-physiological characteristics. The results obtained provide insights to facilitate the selection and cultivation of these genotypes under semi-arid conditions. An analysis of variance demonstrated a significant difference among genotypes for the majority of traits studied. The genotypes G2, G3, and G5 recorded the highest yield (3.52, 3.48, and 2.89 t ha⁻¹, respectively) with a moderate water content and low values of temperature with G (22 °C), G3 (22.43 °C), and G3 (24.63 °C). Correlation among assed characters revealed that grain yield showed a positive and significant association with the number of grains per spike and a non-significant relationship with the number of spikes per m² and the thousand kernel weights. However, a non-significant association was found between all physiological traits. Moreover, the principal component analysis displayed three components. The first component related to GY and TKW genotypes associated with this axis exhibited high values of these traits. The second was the physiological axis; their genotypes were the most tolerant to semi-arid conditions. The results of the mean performance revealed that the genotypes Bousselem, G2, and G5 were the appropriate genotypes for growing under semi-arid conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

Special thanks are extended to ITGC-AES of Setif for providing the genetic materials, and sincere gratitude is expressed to the personnel of the National Institute of the Agronomic Research of Algeria, Research Unit of Setif (INRAA).

REFERENCES

- Alqudah AM and Thorsten S (2015) Barley leaf area and leaf growth rates are maximized during the pre-anthesis phase. *Agronomy* 5(2): 107-129. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020107>
- Anzer UI, Ashok KC, Satyaveer SD and Renu M (2017) Cell membrane stability- an important criterion for selection of heat tolerant genotypes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Applied and Natural Science* 9 (4): 1894– 900. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i4.1458>
- Ara A, Mohi ud din R and Mehraj U (2018) Principal component analysis for assessing phenotypic parameters in *Brassica rapa* var. *Brown sarson*. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering* 7(4): 288-289.
- Atar F, Güney D, Bayraktar A, Yıldırım N and Turna I (2020) Seasonal change of chlorophyll content (spad value) in some tree and shrub species. *Turkish Journal of Forest Science* 4(2): 245- 256. <https://doi.org/10.32328/turkforsci.711389>
- Bajji M, Lutts S and Kinet JM (2001) Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf aging in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science* 160(4): 669–681. [https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(00\)00443-x](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(00)00443-x)
- Bali AS and Sidhu GPS (2019) Abiotic stress-induced oxidative stress in wheat. pp. 225-239. In: *Wheat Production in Changing Environments: Responses, Adaptation and Tolerance* https://doi.org/10.1007/978-981-13-6883-7_10
- Bazzaz MM, Khaliq QA, Karim MA et al (2015) Canopy temperature and yield based selection of wheat genotypes for water deficit environment. *Open Access Library Journal*. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101917>
- Bendada H (2021) Contribution to the selection of the adaptation of some barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) in the semi-arid agro-climatic conditions of the Setif region (Doctoral thesis). Mohamed Boudiaf m'sila University. 133 p.
- Bendjama A and Ramdani S (2021) Genetic variability of some agronomic traits in a collection of wheat (*Triticum turgidum* L. ssp) genotypes under South Mediterranean growth conditions. *Italian Journal of Agronomy (AOP)*. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1976>
- Bogale A and Tesfaye K (2016) Relationship between grain yield and yield components of the Ethiopian durum wheat genotypes at various growth stages. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 19(1): 81-91. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93945700007>
- Boudersa N, Chaib G, Cherfia R, Atoui A and Boudour L (2021) Biological and agronomic characterization of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivated in the region of Constantine, Algeria. *South Asian Journal Experimental Biology* 11 (5): 572-582. [https://doi.org/10.38150/sajeb.11\(5\).p572-582](https://doi.org/10.38150/sajeb.11(5).p572-582)
- Chaouachi L, Marín-Sanz M, Kthiri Z et al (2023) The opportunity of using durum wheat landraces to tolerate drought stress: screening morpho-physiological components. *AoB Plants* 15(3): plad022. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plad022>
- Chourghal N, Belguerri H, Maamri K et al (2023) Diagnosis of the rainfall-wheat yield relationship in the current and future climate change conditions in Eastern Algeria. *Biosystems Diversity* 31(2): 158–162. <https://doi.org/10.15421/012316>
- Chowdhury JA, Karim MA, Khaliq QA and Ahmed AU (2017) Effect of drought stress on bio-chemical change and cell membrane stability of soybean genotypes. *Bangladesh Journal of Agricultural Research* 42(3): 475- 485. <https://doi.org/10.3329/bjar.v42i3.34506>
- Del Pozo A, Yáñez A, Iván AM, Gerardo T et al (2016) Physiological traits associated with wheat yield potential and performance under water-stress in a Mediterranean environment. *Frontiers in Plant Science* 7: <http://doi.org/10.3389/fpls.2016.00987>
- Djoudi MBI, Cheniti K, Guendouz A and Louahdi N (2024) Modeling the grain yield loss and quality assessment of some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 77(1): 10563-10572.
- Fellahi Z, Hannachi A, Guendouz A, Rabti A and Bouzerzour H (2019) Héritabilité, corrélations et gain de sélection précoce en F2 de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous conditions semi-arides. *Scientific and Technical Research Centre for Arid Areas (CRSTRA) Journal Algérien des Régions Arides (JARA)* 13(2): 37– 49.

- Feng F, Han Y, Wang S et al (2018) The effect of grain position on genetic improvement of grain number and thousand grain weight in winter wheat in North China. *Frontiers in Plant Science* 9: 129. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00129>
- Frih B, Oulmi A, Guendouz A, Bendada H and Selloum S (2021) Statistical Analysis of the relationships between yield and yield components in some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes growing under semi-arid conditions. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 12(4): 385-392. <https://doi.org/10.23910/1.2021.2431>
- González-Ribot G, Opazo M, Silva P and Acevedo E (2017) Traits explaining durum wheat (*Triticum turgidum* spp. *durum*) yield in dry Chilean Mediterranean environments. *Frontiers in Plant Science* 8: 1781. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01781>
- Guendouz A, Frih B and Oulmi A (2021) Canopy Cover temperature & drought tolerance indices in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid condition in Algeria. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 12(6): 638-644. <https://doi.org/10.23910/1.2021.2508>
- Guendouz A, Semcheddine N, Moumeni L and Hafsi M (2016) The effect of supplementary irrigation on leaf area, specific leaf weight, grain yield and water use efficiency in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics* 2(1): 82-89.
- Hannachi A and Fellahi Z (2023) Efficiency of index-based selection for potential yield in durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) ssp. *turgidum* convar. *durum* (Desf.) Mackey] lines. *Italian Journal of Agronomy* 18(1): <https://doi.org/10.4081/ija.2023.2182>
- Hu N, Du C, Zhang W et al (2022) Did wheat breeding simultaneously improve grain yield and quality of wheat cultivars releasing over the past 20 years in China. *Agronomy* 12 (9): 2109. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092109>
- Hussain S, Shaikat M, Ashraf M et al (2019) Salinity stress in arid and semi-arid climates: Effects and management in field crops. *Climate Change and Agriculture* 13: 201-226. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87982>
- Iqbal MA (2015) Plant nutrients supplementation with foliar application of allelopathic water extracts improves wheat (*Triticum aestivum* L.) yield. *Advance in Agriculture and Biology* 4 (2): 64-70.
- Iqbal T, Hassan G, Hussain I and Saeed S (2017) Assessment of yield components and their association in f2 populations of wheat. *Journal of Scientific Agriculture* 1: 326-334. <https://doi.org/10.25081/jsa.2017.v1.849>
- ITGC - Institut technique des grandes cultures en Algérie (2022) La production de blé.
- Jian H, Wang J, Wang T et al (2016) Identification of rapeseed microRNAs involved in early stage seed germination under salt and drought stresses. *Frontiers in Plant Science* 7: 658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00658>
- Kardile PB, Dahatonde KN, Rakshe MV and Burondkar MM (2018) Effect of moisture stress on leaf relative water content (RWC) of four cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes at different stages of growth. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7 (04): 2645-2649. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.301>
- Kaya LG, Çetin M and Doygun H (2015) A holistic approach in analyzing the landscape potential: Porsuk Dam Lake and its environs, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 18(8): 1525-1533.
- Keyvan S (2010) The effects of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrates and chlorophyll of bread wheat cultivars. *Journal of Animal & Plant Sciences* 8(3): 1051-1060.
- Bayoumi YA, Dakhly DM, Bassiouny YA and Hashish NM (2015) Addition of growth hormone to the microflare stimulation protocol among women with poor ovarian response. *International Journal of Gynecology & Obstetrics* 131(3): 305-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2015.05.034>
- Kohila S and Gomathi R (2018) Adaptive physiological and biochemical response of sugarcane genotypes to high temperature stress. *Indian Journal of Plant Physiology* 23(2): 245-260. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0363-y>
- Krishnamurthy L, Zaman-Allah M, Purushothaman R et al (2011) Plant biomass productivity under abiotic stresses in SAT agriculture. *Biomass-Detection, Production and Usage* 247-264. <https://doi.org/10.5772/17279>
- Liu H, Searle IR, Mather DE et al (2015) Morphological, physiological and yield responses of durum wheat to pre-anthesis water-deficit stress are genotype-dependent. *Crop and Pasture Science* 66(10): 1024-1038. <https://doi.org/10.1071/CP15013>
- MajidiMehar A, El Gataa Z, Abyar S and Nourinejad H (2024) Genetic variability and evaluation of water-deficit stress tolerant of spring bread wheat genotypes using drought tolerance indices. *Ecological Genetics and Genomics* 100-227. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2024.100227>
- Mamrutha HM, Rinki, Singh SK et al (2022) Abiotic stress tolerance in wheat: physiological interventions. pp. 507-530. In: *New Horizons in Wheat and Barley Research: Global Trends, Breeding and Quality Enhancement*. Springer Singapore, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4449-8_20
- Mansouri A, Oudjehih B, Benbelkacem A et al (2018) 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. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2018/8191749>
- Mao H, Li S, Chen B et al (2022) Variation in cis-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in wheat. *Molecular Plant, Research Article* 15(2): 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.11.007>
- Mekaooussi R, Rabti A, Fellahi Z et al (2021) Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices. *Acta Agriculturae Slovenica* 117/2-2021. <https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.2.2021>
- Melandri G, Prashar A, McCouch S et al (2020) Association mapping and genetic dissection of drought-induced canopy temperature differences in rice. *Journal of Experimental Botany* 71(4): 1614-1627. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz527>
- Mohammadi M, Sharifi P and Karimizadeh R (2014) Stability Analysis of durum wheat genotypes by regression parameters in dryland conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 62(5): 1049-1056. <https://doi.org/10.11118/actaun201462051049>
- Mohammadi R, Etmnan A and Shoshtari L (2018) Agro-physiological characterization of durum wheat genotypes under drought conditions. *Experimental Agriculture* 55(3): 484-499. <https://doi.org/10.1017/S0014479718000133>
- Naveed M, Hussain MB, Zahir ZA et al (2014) Drought stress

amelioration in wheat through inoculation with Burkholderia phytofirmans strain PsJN. Plant Growth Regul 73:121–131. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9874-8>

Nor A, Abdul RH, Mohd R, Norain MN and Nur I (2015) Correlation Analysis on Agronomic Characters in F1 population derived from a cross of Pongsu Seribu 2 and MR 264. Conference Title: R and D Seminar 2014: Research and Development Seminar.

Nouri A, Etminan A, Jaime A, Teixeira da Silva JA and Mohammadi R (2011) Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var. *durum* Desf.). Australian journal of crop science AJCS 5(1):8-16.

Othmani A, Sourour A, Zoubeir C and Ben Younes M (2021) Screening for PEG-induced drought stress tolerance in seedlings of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. Pakistan Journal of Botany 53(3), 823-832.

Oulmi A, Guendouz A, Semcheddine et al (2020) Study of direct response and related to the early selection of durum wheat (*triticum durum* desf.) genotypes growing under semi-arid conditions. PONTE Journal 12-1(76), 249-267. <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2020.12.13>

Pask AJD, Pietragalla J, Mullan DM and Reynolds MP (2012) Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping. Mexico D. F. CIMMYT. Mexico. 132 p.

Pour-Aboughadareh A, Mohammadi R, Etminan A et al (2020) Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. Sustainability 12(14): 5610. <https://doi.org/10.3390/su12145610>

Ramadan T, Sayed SA, Abd-Elaal KA and Amro A (2022) The combined effect of water deficit stress and TiO₂ nanoparticles on cell membrane and antioxidant enzymes in *Helianthus annuus* L. Physiology and Molecular Biology of Plants 28 (2): 391–409. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01153-z>

Rehman SU, Muhammad Bilal A, Rashid MR, Muhammad NT et al (2016) Cell membrane stability and chlorophyll content variation in wheat (*Triticum aestivum* L) genotypes under heat and drought conditions. Crop and Pasture Science. <https://doi.org/10.1071/CP15385>

Singh B, Kumar S, Elangovan A et al (2023) Phenomics based prediction of plant biomass and leaf area in wheat using machine learning approaches. Frontiers in Plant Science 14: 1214801. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1214801>

Singh SK, Barman M, Prasad JP and Bahuguna RN (2022) Phenotyping diverse wheat genotypes under terminal heat stress reveal canopy temperature as critical determinant of grain yield. Plant Physiology Reports 27: 335–344. <http://doi.org/10.1007/s40502-022-00647-y>

Slama A, Mallek-Maalej E, Ben Mohamed H et al (2018) A return to the genetic heritage of durum wheat to cope with drought heightened by climate change. PLoS ONE 13 (5): e0196873. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196873>

Sohail M, Hussain I, Qamar M et al (2020) Evaluation of spring wheat genotypes for climatic adaptability using canopy temperature as physiological indicator. Pakistan Journal of Agricultural Research 33(1): 89-96. <http://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.1.89.96>

Spagnoletti-Zeuli PL and Qualset CO (1990) Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. Plant Breeding 105 (3): 189–202. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1990.tb01196.x>

Thapa S, Jessup KE, Pradhan GP et al (2018) Canopy temperature depression at grain filling correlates to winter wheat yield in the U.S. Southern High Plains. Field Crops Research 217: 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.005>

Tshikunde NM, Mashilo J, Shimelis H and Odindo A (2019) Agronomic and physiological traits, and associated quantitative trait loci (QTL) affecting yield response in wheat (*Triticum aestivum* L.): A review. Frontiers Plant Sciences 10:1428. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01428>

Ullah MI, Mahpara S, Bibi R et al (2021) Grain yield and correlated traits of bread wheat lines: Implications for yield improvement. Saudi Journal of Biological Sciences. 28(10): 5714-5719. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.006>

Wang J, Liu H, Zhao C et al (2022) Mapping and validation of major and stable QTL for flag leaf size from tetraploid wheat. The Plant Genome 15: e20252. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20252>

Wolde GM, Mascher M and Schnurbusch T (2019) Genetic modification of spikelet arrangement in wheat increases grain number without significantly affecting grain weight. Molecular Genetics and Genomics 294: 457–468. <http://doi.org/10.1007/s00438-018-1523-5>

Würschum T, Leiser WL, Langer SM, Tucker MR and Longin CFH (2018) Phenotypic and genetic analysis of spike and kernel characteristics in wheat reveals long-term genetic trends of grain yield components. Theoretical and Applied Genetics 131: 2071–2084. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3133-3>

Xynias I, Mylonas I, Korpetis G et al (2020) Durum wheat breeding in the mediterranean region: Current status and future prospects. Agronomy 10: 432. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030432>

Yang B, Wen X, Wen H et al (2022) Identification and validation of quantitative trait loci for chlorophyll content of flag leaf in wheat under different phosphorus treatments. Frontiers in Plant Science. 13: 1019012. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019012>

Evaluation of chlorophyll content and membrane stability under oxidative stress induced by glyphosate herbicide as indicators of drought tolerance in some advanced durum wheat (*Triticum durum* L.) lines: *in vitro* study

Evaluación del contenido de clorofila y la estabilidad de la membrana bajo estrés oxidativo inducido por el herbicida glifosato como indicadores de tolerancia a la sequía en algunas líneas avanzadas de trigo duro (*Triticum durum* L.): estudio *in vitro*

Avaliação do teor de clorofila e da estabilidade da membrana sob estresse oxidativo induzido pelo herbicida glifosato como indicadores de tolerância à seca em algumas linhagens avançadas de trigo duro (*Triticum durum* L.): estudo *in vitro*

Sarah Benkadja^{1*}  

Abdelmalek Oulmi²  

Benalia Frih²  

Hocine Bendada³  

Ali Guendouz⁴  

Amar Benmahammed²  

Rev. Fac. Agron. (LUZ). 2023, 40(1): e234007

ISSN 2477-9407

DOI: [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v40.n1.07](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v40.n1.07)

¹Department of Agronomy, VRBN Laboratory, Faculty of Nature and Life Sciences, Farhat Abbas University of Setif, Algeria.

²Department of Biology and Plant Ecology, VRBN Laboratory, Faculty of Nature and Life Sciences, Farhat Abbas University of Setif, Algeria.

³Department of Agricultural Sciences, Relizane University, Relizane, Algeria.

⁴National Agronomic Research Institute of Algeria (INRAA), Setif Research Unit, Algeria.

Crop Production

Associate editor: Professor Andreina García de González
University of Zululand, Faculty of Agronomy
Bolivarian Republic of Venezuela

Received: 16-11-2022

Accepted: 26-01-2023

Published: 04-02-2023

Keywords:

Electrolyte leakage
Chlorophyll loss
Tolerant
Sensitivity

Abstract

Oxidative stress caused by glyphosate is a complex chemical and physiological phenomenon and develops as a result of overproduction and accumulation of reactive oxygen species (ROS). This study was carried out *in vitro* at the National Institute of Agronomic Research of Algeria (INRAA) Setif, to select the most susceptible durum wheat (*Triticum durum* L.) under oxidative stress induced by glyphosate herbicide by evaluating chlorophyll content degradation and cell membrane leakage. Genotypes showed significant variations in almost all the studied traits. The chlorophyll loss ratio ranged from 26.42 % for the genotype G5 to 48.75 % for the local variety Boutaleb, glyphosate sensitivity index values were found to be between 0.65-1.2, the advanced line G5 was found to be the most tolerant under oxidative stress with the lowest chlorophyll loss ratio and lowest Glyphosate sensitivity index. Furthermore, the advanced line G4 recorded the highest electrolyte leakage (80.16 %) while G6 showed the lowest estimate (50.77 %). Therefore, advanced lines G5 and G6 appear the most suitable for the growing conditions.

Resumen

El estrés oxidativo causado por el glifosato es un fenómeno químico y fisiológico complejo y se desarrolla como resultado de la sobre producción y acumulación de especies reactivas del oxígeno (ROS). Este estudio se llevó a cabo *in vitro* en el Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Argelia (INRAA) Setif, para seleccionar el trigo duro (*Triticum durum* L.) más susceptible bajo estrés oxidativo inducido por el herbicida glifosato mediante la evaluación de la degradación del contenido de clorofila y la fuga de la membrana celular. Los genotipos mostraron variaciones significativas en casi todos los rasgos estudiados. El índice de pérdida de clorofila osciló entre el 26,42 % del genotipo G5 y el 48,75 % de la variedad local Boutaleb, y los valores del índice de sensibilidad al glifosato se situaron entre 0,65 y 1,2. La línea avanzada G5 resultó ser la más tolerante al estrés oxidativo, con el menor índice de pérdida de clorofila y el menor índice de sensibilidad al glifosato. Además, la línea avanzada G4 registró la mayor pérdida de electrolitos (80,16 %), mientras que G6 mostró la estimación más baja (50,77 %). Por lo tanto, las líneas avanzadas G5 y G6 parecen las más adecuadas para las condiciones de crecimiento.

Palabras clave: fuga de electrolitos, pérdida de clorofila, tolerancia, sensibilidad.

Resumo

Estresse oxidativo causado pelo glifosato é um fenômeno químico e fisiológico complexo e se desenvolve como resultado da superprodução e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS). Este estudo foi realizado *in vitro* no Instituto Nacional de Pesquisas Agronômicas da Argélia (INRAA) Setif, para selecionar o trigo duro mais suscetível (*Triticum durum* L.) sob estresse oxidativo induzido pelo herbicida glifosato, avaliando a degradação do teor de clorofila e o vazamento da membrana celular. Os genótipos mostraram variações significativas em quase todos os traços estudados. A taxa de perda de clorofila variou de 26,42 % para o genótipo G5 a 48,75 % para a variedade local Boutaleb, os valores do índice de sensibilidade ao glifosato foram encontrados entre 0,65-1,2, a linha avançada G5 foi encontrada como a mais tolerante sob estresse oxidativo com a menor taxa de perda de clorofila e o menor índice de sensibilidade ao glifosato. Além disso, a linha avançada G4 registrou o maior vazamento de eletrólitos (80,16%), enquanto G6 apresentou a estimativa mais baixa (50,77 %). Portanto, as linhas avançadas G5 e G6 parecem ser as mais adequadas para as condições de crescimento.

Palabras-chave: vazamento de eletrólitos, perda de clorofila, tolerante, sensibilidade.

Introduction

During the last 50 years, increased global population and varied consumption preference have led to the elevated demand for wheat commodities worldwide, also considering that wheat is a staple food for more than 35 % of the world population (FAO, 2020). Durum wheat often experiences drought stress conditions during crop cycle. Thus, improvement of durum wheat tolerant to drought is a major objective in plant breeding programs for arid and semi-arid regions (Oulmi and Aissaoui, 2022; Singh *et al.*, 2022; Thakur *et al.*, 2022). Glyphosate (N-[phosphonomethyl]-glycine) is the most commonly

used non-selective herbicide worldwide (Soares *et al.*, 2019) since its commercialisation by Monsanto in the 1970. Glyphosate has been shown to affect plant physiological mechanisms such as photosynthesis, mineral nutrition and oxidative events (Rivas-Garcia *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2014). Along with the inhibition of specific target sites, glyphosate action also leads to oxidative stress in plants, which is most probably a secondary effect of the blocked shikimate pathway (Freitas-Silva *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2014). Oxidative stress in wheat and maize was observed in plants exposed to glyphosate as a consequence of reactive oxygen species (ROS) accumulation. Plants are able to avoid ROS adverse effects by detoxify them through the action of both enzymatic and non-enzymatic antioxidants. Additionally, increasing ROS production may adversely affect photosynthetic processes, i.e. by decreasing the amount of chlorophyll and the photochemical efficiency, which reduces plant growth. Indeed, previous studies have shown that plants exposed to glyphosate application have lower chlorophyll content. These findings have been attributed to either increased chlorophyll degradation or decreased chlorophyll synthesis (Ibrahim *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2017). Photosynthesis plays a vital role in the synthesis and accumulation of organic matter, plant growth, nutrient absorption and response to abiotic or biotic stress. The aim of this research is to evaluate the behaviour of some advanced lines of durum wheat under the effects of oxidative stress induced by glyphosate, based on the estimation of chlorophyll degradation and electrolyte leakage from injured cells in order to select the adapted advanced lines.

Materials and methods

Plant material

This study was conducted during the 2021/2022 cropping seasons at National Institute of Agronomic Research of Algeria – INRAA - Setif. The genetic material used in this study consisted of 6 advanced lines and 4 genotypes, 3 out of them were local varieties used as control to evaluate their performance under oxidative stress (table 1).

Table 1. The pedigrees of the genotypes lines tested.

Genotype/Lines	Pedigrees
G1	RASCON_37/GREEN_2/9/USDA595/3/D67.3/RABI/CRA/4/ALO/5/...
G2	MINIMUS_6/PLATA_16/IMMER/3/SOOTY_9/RASCON_37/9/...
G3	CMH77.774/CORM//SOOTY-9/RASCON-37/3/SOMAT-4
G4	CNDO/PRIMADUR//HAI-OU-17/3/SNITAN/4/SOMAT-3/CNDO/VEE//CELTA/3/PATA_2/6/ARAM_7//CREX/ALLA/5/ENTE/ ...
G5	SILVER 14/MOEWEE//BISU_1/PATKA_3/3/PORRON_4/YUAN_1/9/...
G6	
Jupare C 2001	STINKPOT//ALTAR-84/ALONDRA
Bousselem	Heider/Martes/Huevos de Oro. ICD-414
Boutaleb	GTA dur /Ofanto
Oued el bared	Hedba3/Ofanto

Experimental details

The genotypes tested were sown on December 14th, 2021 with sowing density adjusted to 300 grains.m⁻² in a random block design with three replications, each plot consisted of 6 lines of 10 m long

spaced of 0.2 m which make 12 m² as plot area. At heading stage, three flag leaves of each genotype were cut and dipped in 10 mL of 5 mM glyphosate solution (dissolved in distilled water). Daily, the chlorophyll contents (CC) of each flag leaf were measured using digital chlorophyll meter (CCM) with (cci) units; this device allows to measure the absorbance of light in the leaf. Electrolyte leakage of leaf tissues were measured using the method developed by Baji *et al.* (2001) with minor modifications: two leaves were randomly collected for each genotypes, washed with tap water then with distilled water and cut into 1 cm length segments. The segments were placed in tubes with 10 mL of distilled water and incubated for 24 h at the ambient temperature of the laboratory. Subsequently, the first reading (EC1) was carried out. The final conductivity (EC2) was measured after adding 0.02 mL of pure glyphosate to each tube. The relative electrolyte leakage (REL %) was calculated as follows: REL (%) = (EC1/EC2) × 100. Glyphosate sensitivity index (GSI) was calculated to determine the genotypes sensitivity to oxidative stress induced by glyphosate herbicide, GSI = chlorophyll loss for each genotype / Mean.

Results and discussion

Degradation of Chlorophyll content

Chlorophyll content of leaf before and after 6 days of treatment with glyphosate is presented in table 2. Chlorophyll content values before treatment ranged from 31.85 cci for the advanced line G5 to 53.7 cci for the introduced genotype Jupare C 2001 with an average of 45.76 cci over all genotypes, while after glyphosate application during six days the chlorophyll content decreased and the values varied between 4.35 to 14.32 cci, the highest value was obtained from the advanced line (G1) while the variety Boutaleb registered the lowest value. The decrease in total chlorophyll amount correlates with the increase in the number of days after glyphosate application (figure 1). Ahsan

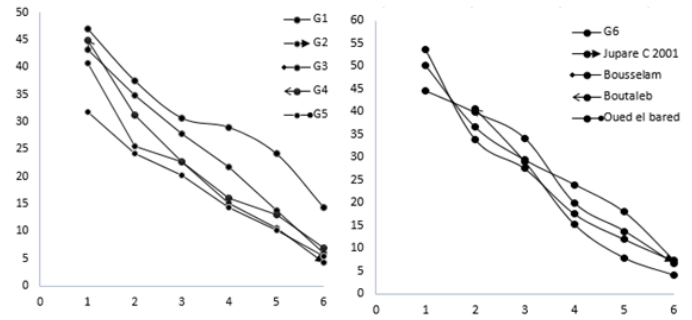


Figure 1. Degradation of chlorophyll content for durum wheat genotypes after glyphosate application.

et al. (2008) found that using glyphosate herbicide causes plants to experience oxidative stress. Our finding agree with Malalgoda *et al.* (2020) who reported that glyphosate herbicide could reduce the synthesis of chlorophyll content, which might lead to less starch accumulating. Furthermore, Bali and Sidhu (2019) reported that a significant reduction in yield might be due to the reduced rates of net photosynthesis, stomatal closure, and oxidative damage to chloroplast. Chlorophyll losses due to oxidative stress induced by glyphosate application and its velocity are shown in Table 2. ANOVA showed that genotypes effect was highly significant ($P < 0.05$) with all parameters calculated. Chlorophyll loss ratio has been used to detect the genotypic differences in response to glyphosate application. The local variety Boutaleb showed the highest loss ratio (48.75 %), and the highest value of Velocity of degradation of chlorophyll (9.23). On the contrary, the lowest chlorophyll loss ratio (26.42 %) was registered by the line G5, with the lowest Velocity of chlorophyll degradation (4.64). Gomez *et al.* (2017) studied the response of willow to oxidative stress induced by various glyphosate concentrations and found that the decrease in chlorophyll concentration may also be due to its

Table 2. Chlorophyll content of leaf before and after glyphosate application, chlorophyll loss (%), index of sensitivity to glyphosate, and velocity of chlorophyll degradation for genotypes tested.

Genotypes	CC before Gly application (cci)	CC after Gly application (6 Days after) (cci)	Chlorophyll loss ratio(%)	Velocity of chlorophyll degradation	Gly sensitivity index (GSI)	Score
G1	51.67 ^{bc}	14.32 ^a	37.35 ^{de}	6.16 ^e	0.93 ^{de}	4
G2	40.8 ^e	4.35 ^{fg}	36.45 ^{de}	6.44 ^{de}	0.9 ^{de}	3
G3	43.27 ^d	6.02 ^{de}	37.25 ^{de}	6.41 ^{de}	0.96	5
G4	44.97 ^d	6.82 ^{bcd}	38.15 ^d	6.79 ^d	0.95 ^d	7
G5	31.85 ^f	5.42 ^{ef}	26.42 ^f	4.64 ^g	0.65 ^f	1
G6	50.02 ^c	7.47 ^{bc}	42.55 ^c	7.35 ^c	1.06 ^C	8
Jupare C 2001	53.7 ^a	7.2 ^{bcd}	46.5 ^b	8.65 ^b	1.15 ^b	9
Bousselem	44.62 ^d	6.6 ^{cde}	38.02 ^d	6.64 ^d	0.94 ^d	6
Boutaleb	52.87 ^{ab}	4.12 ^g	48.75 ^a	9.23 ^a	1.21 ^a	10
Oued el Bared	43.87 ^d	7.9 ^b	35.97 ^c	5.59 ^f	0.89 ^e	2
Mean	45.76	7.02	40.11	6.79	0.96	
Min	31.85	4.12	26.42	4.64	0.65	
Max	53.7	14.32	48.75	9.23	1.21	
LSD (5%)	1.95	1.25	1.85	0.48	0.04	
Effect genotype	***	***	***	***	***	

***: highly significant effect at 5%, CC: Chlorophyll content, Gly: glyphosate, GSI: Glyphosate sensitivity index.

degradation by increased ROS content. Chlorophyll loss was shown to be accompanied by the damage of the mesophyll chloroplasts, which led to a lower photosynthetic rate (Khalilzadeh *et al.*, 2016). The study reported by Zobiole *et al.* (2011) demonstrated that Glyphosate significantly decreased chlorophyll content in soybean compared with the non-glyphosate control. This decrease could be due to direct damage of the chloroplast in the presence of glyphosate, as plants from all maturity groups exposed to a single or sequential application of glyphosate frequently had chlorophyll concentrations lower than plants that were not exposed to this herbicide. It's also well known that a decrease in the chlorophyll content could be due to a decrease in the stomata aperture, aimed at limiting water losses by evaporation and by increased resistance to the entry of atmospheric CO₂ necessary for photosynthesis (Zhu *et al.*, 2016; Enneb *et al.*, 2020). Karabulut and Çanakçı (2021) showed that the oxidative stress created by glyphosate treatment caused decrease in chlorophyll (a+b). As well, Caglar *et al.* (2011) analyzed the effects of the herbicide paraquat on chlorophyll content, observing that bread wheat varieties after paraquat herbicide treatment decreased chlorophyll content. Glyphosate sensitivity index (GSI) for the examined durum wheat varied between 0.65-1.21, the differences among all genotypes tested were highly significant (table 2). The variety Boutaleb was observed as the most sensitive to oxidative stress followed by Jupare C 2001. However, advanced line G5 recorded the lowest GSI thus appeared as the most tolerant to oxidative stress. Based on the ranking for traits illustrated in table 2, genotypes G5 and Oued el bared were the best performing under oxidative stress.

Electrolyte leakage

Plant membranes are subject to changes often associated with increases in permeability and loss of integrity under environmental stresses (Masoumi *et al.*, 2010). Evaluation of cell damage degree was accomplished for the ten genotypes using membrane stability index: Electrolyte leakage has been recommended as a useful criterion for the selection of stress-tolerant cultivars in several crop species (Slama *et al.*, 2018). Moreover, ion leakage has been used as an efficient measure for the evaluation of the damage induced by herbicide that affects the integrity of the membranes (Silva *et al.*, 2016). There was a significant difference in the amount of electrolyte leakage (REL %) from leaf tissues for the genotypes tested, with a mean of 64.8 % (table 3). Line G6 exhibited the lowest value implying that this genotype was the most resistant under oxidative stress and line G4 the most susceptible ones. The ability of cell membranes to control the rate of ion movement in and out of cells is used as a test of damage to a great range of tissues (Masoumi *et al.*, 2010). Glyphosate caused oxidative damage in plants and disturbed cellular homeostasis of plants. Under oxidative stress production of ROS increased, thus oxidizing lipids of membranes, and increasing their permeability that leads to ion leakage (Sakya *et al.*, 2018).

Conclusion

Oxidative damage induced by glyphosate herbicide affects the physiological parameters of the examined durum wheat. Hence, these parameters can be used as a criterion to select adapted genotypes to oxidative stress. Our study revealed significant variations among the genotypes ($P < 0.05$). The genotypes with the lowest velocity of chlorophyll degradation and the lowest chlorophyll ratio yielded the lowest sensitivity to oxidative stress. The advanced line G5 was recorded as the most tolerant to oxidative stress. Based on our

findings, the highest value of injured cells was observed in advanced line G4, while line G6 recorded the lowest, indicating that it could maintain high membrane integrity during oxidative stress. We can conclude that both advanced lines G5 and G6 are very suitable to the growing conditions.

Table 3. Changes in relative electrolyte Leakage (%) of ten durum wheat genotypes under Oxidative stress.

Genotypes	REL%
G1	61.86 ^{bd}
G2	64.29 ^{bc}
G3	66.67 ^{bc}
G4	80.16 ^a
G5	72.57 ^{ab}
G6	50.77 ^d
Jupare C 2001	61.73 ^{bd}
Bousselem	58.2 ^{cd}
Boutaleb	69.42 ^{abc}
Oued el bared	62.35 ^{bd}
Mean	64.8
Max	80.16
Min	50.77
CV	13
LSD	11.64
Effect genotype	**

****:** significant effect at 5 %, REL%: Electrolyte leakage.

Literature cited

- Ahsan, N., Lee, D.G., Lee, K.W., Alam, I., Lee, S.H., Bahk, J.D., Lee, B.H. (2008). Glyphosate induced oxidative stress in rice leaves revealed by proteomic approach. *Plant Physiology and Biochemistry* 46, 1062–1070. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.07.002>.
- Bajji, M., Lutts, S and Kinet, J.M. (2001). Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science* 160(4), 669–681. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00443-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00443-X).
- Bali, A.S. and Sidhu, G.P.S. (2019). Abiotic Stress-Induced Oxidative Stress in Wheat. M. Hasanuzzaman et al. (eds.), *Wheat Production in Changing Environments*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/9781789248098.0019>.
- Caglar, O., Ozturk, A., Aydin, M., Bayram, S. (2011). Paraquat tolerance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Journal of animal and veterinary advances* 10, 3363-3367. <https://doi.org/10.3923/javaa.2011.3363.3367>.
- Enneb, H., Ben Yahya, L., Ilyas, M., Asaram Dhale, D., Bagues, M. and Nagaz, K. (2020). Influence of Water Stress on Growth, Chlorophyll Contents and Solute Accumulation in Three Accessions of *Vicia faba* L. from Tunisian Arid Region. Abiotic stress in plants. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94563>.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Crop Prospects and Food Situation - Quarterly Global Report n°. 4, December (2020). Rome. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Freitas-Silva, L., Rodríguez-Ruiz, M., Houmani, H., da Silva, L.C., Palma, J.M., and Corpas F.J. (2017). Glyphosate-induced oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* affecting peroxisomal metabolism and triggers activity in the oxidative phase of the pentose phosphate pathway (OxPPP) involved in NADPH generation. *Journal Plant Physiology*, 218, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.08.007>.
- Gomes, M. P., Le Manac'h, S. G., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lucotte, M and Juneau, P. (2017). Glyphosate-Dependent Inhibition of Photosynthesis in Willow. *Frontiers in Plant Science*, 8, 207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00207>.
- Gomes, M.P., Smedbol, E., Chalifour, A., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lepage, L., Lucotte, M. and Juneau, P. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic

- acid: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4691–4703. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru269>.
- Ibrahim, R.I.H., Alkhudairi, U.A., and Alhusayni, S.A.S. (2022). Alleviation of Herbicide Toxicity in *Solanum lycopersicum* L.-An Antioxidant Stimulation Approach. *Plants*, 11(17), 2261. <https://doi.org/10.3390/plants11172261>.
- Karabulut, F., and Çanakçı, S. (2021). Effects of Glyphosate Herbicide on Photosynthetic Pigments and Antioxidant Enzyme Activities in Corn (*Zea mays* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, 4(2), 61–66. <https://doi.org/10.54565/jphcfum.1004433>.
- Khalilzadeh, R., Sharifi, R., and Jalilian, J. (2016). Antioxidant status and physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to cycocel application and bio fertilizers under water limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 130–137. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1221150>.
- Malalgoda, M., Ohm, J.B., Howatt, K.A., and Simsek, S. (2020). Pre-harvest glyphosate application and effects on wheat starch chemistry: Analysis from application to harvest. *Journal of Food Biochemistry*, 44(8), e13330. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13330>.
- Masoumi, A., Kafi, M., Khazaei, H., and Davari, K. (2010). Effect of drought stress on water status, electrolyte leakage and enzymatic antioxidants of kochia (*Kochia scoparia*) under saline condition. *Pakistan Journal of Botany*, 42(5), 3517–3524.
- Oulmi, A., and Aissaoui, M.R. (2022). Canopy temperature and chlorophyll content as plant traits indicators for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) superior lines selection under semi-arid conditions. *Agricultural Science and Technology*, 14(2), 114–122. <https://doi.org/10.15547/ast.2022.02.027>.
- Rivas-Garcia, T., Espinosa-Calderón, A., Hernández-Vázquez, B., and Schwentesius-Rindermann, R. (2022). Overview of Environmental and Health Effects Related to Glyphosate Usage. *Sustainability*, 14(11), 6868. <https://doi.org/10.3390/su14116868>.
- Sakya, A.T., Sulistyaningsih, E., Indradewa, D., and Purwanto, B.H. (2018). Physiological characters and tomato yield under drought stress. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 200, 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012043>.
- Silva, K.S., Urban, L.J. K., Balbinota, A., Gnolato, F.S., KRUSE, N.D., Marchesan, E., and Machado, S.L.O. (2016). Electrolyte Leakage and the Protective Effect of Nitric Oxide On Leaves Of Flooded Rice Exposed To Herbicides. *Planta Daninha*, 29(4), 837–847. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582016340400018>.
- Singh, S.K., Kumar, J. P., Kaur G.S., Datta, S., Singh, V., Dhaka, D., Kapoor, A.B., Wani, D. S., Dhanjal, M., Kumar, L., Harikumar, and J. Singh. (2020). Herbicide Glyphosate: Toxicity and Microbial Degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20): 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>.
- Singh, S.K., Barman, M., Prasad J.P., and Bahuguna. R.N. (2022). Phenotyping diverse wheat genotypes under terminal heat stress reveal canopy temperature as critical determinant of grain yield. *Plant Physiology Reports* 27, 335–344. <https://doi.org/10.1007/s40502-022-00647-y>.
- Slama, A., Mallek-Maalej, E., Ben Mohamed, H., Rhim, T., and Radhouane, L. (2018). A return to the genetic heritage of durum wheat to cope with drought heightened by climate change. *PLoS ONE* 13(5), e0196873.. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196873>.
- Soares, C., Pereira, R., Spormann, S., and Fidalgo, F. (2019). Is soil contamination by a glyphosate commercial formulation truly harmless to non-target plants - evaluation of oxidative damage and antioxidant responses in tomato. *Environmental pollution*, 247, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.063>.
- Thakur, V., Rane, J., and Nankar, A.N. (2022). Comparative Analysis of Canopy Cooling in wheat under High Temperature and Drought Stress. *Agronomy*, 12(4), 978. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040978>.
- Zhu, M., Li F.H., and Shi, Z.S. (2016). Morphological and photosynthetic response of waxy corn inbred line to waterlogging. *Photosynthetica* 54, 636–640. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0203-0>.
- Zobiole, L.H.S., Kremer, R.J., Oliveira, J.R.S., Constantin, J., and Oliveira RS. (2011). Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of “second generation” glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). *Pesticide Biochemistry and Physiology* 99, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.10.005>.

Lipid Peroxidation, Proline Content and Soluble Sugars as indicators of Oxidative Stress Tolerance in Some Advanced Durum Wheat Lines (*Triticum durum* Desf.).

Peroxidación lipídica, contenido en prolina libre y azúcares solubles como indicadores de tolerancia al estrés oxidativo en algunas líneas avanzadas de trigo duro (*Triticum durum* Desf.).

Peroxidação lipídica, teor de prolina livre e açúcares solúveis como indicadores de tolerância ao estresse oxidativo em algumas linhagens avançadas de trigo-duro (*Triticum durum* Desf.).

Abdelmalek Oulmi¹  

Sarah Benkadja^{2*}  

Ali Guendouz³  

Benalia Frih¹  

Amor Mehanni⁴  

Samir Selloum⁴  

Rev. Fac. Agron. (LUZ). 2023, 40(2): e234018

ISSN 2477-9407

DOI: [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v40.n2.08](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v40.n2.08)

¹Department of Biology and Plant Ecology, Valorization of Natural Biological Resources Laboratory, Farhat Abbas University Setif 1, Algeria.

²Department of Agronomy, Valorization of Natural Biological Resources Laboratory, Farhat Abbas University of Setif, Algeria.

³National Institute of Agronomic Research of Algeria (INRAA), Setif Unit, Algeria.

⁴Technical Institute of Field Crops, Setif, Algeria.

Crop Production

Associate editor: Professor Andreina García de González  
University of Zulia, Faculty of Agronomy
Bolivarian Republic of Venezuela

Received: 18-03-2023

Accepted: 28-04-2023

Published: 23-05-2023

Keywords:

Membrane damage
Glyphosate
Reactive oxygen species
Tolerance

Abstract

Oxidative stress induced by glyphosate is a complex phenomenon caused by an imbalance between reactive oxygen species (ROS) and antioxidants in plants cells. The present research was carried out at the field crops institute, Agricultural Experimental Station of Setif (ITGC-AES), to assess the response of some durum wheat (*Triticum Durum* Desf.) lines exposed to oxidative stress induced by glyphosate herbicide. In the heading stage, a solution of 5 Mm of glyphosate was sprayed on flag leaves, and each measurement was taken 48 hours after the glyphosate application. Lipid peroxidation, free proline and soluble sugars were determined. The results indicated that oxidative stress increased the content of lipid peroxidation, proline, and soluble sugars in flag leaves. Analysis of variance revealed significant differences among the genotypes tested, the increase in the level of lipid peroxidation is much higher in advanced lines G5 and G3, in which lipid peroxidation and membrane damage are greater. Oxidative damage also increased the proline content in lines G3 and G4, and soluble sugars in line G5, which were showing a high tolerance to the oxidative stress induced.

Resumen

El estrés oxidativo inducido por el glifosato es un fenómeno complejo causado por un desequilibrio entre las especies de oxígeno reactivo (ROS) y los antioxidantes en las células de las plantas. La presente investigación se llevó a cabo en el instituto de cultivos de campo, Estación Experimental Agrícola de Setif (ITGC-AES), para evaluar la respuesta de líneas de trigo duro (*Triticum Durum* Desf.) expuestas al estrés oxidativo inducido por el herbicida glifosato. En la etapa de encabezamiento, se pulverizó una solución de 5 Mm de glifosato en las hojas bandera, y cada medición se tomó 48 horas después de la aplicación del glifosato. Se determinó la peroxidación de lípidos, prolina libre y azúcares solubles. Los resultados indicaron que el estrés oxidativo aumentó el contenido de Peroxidación lipídica, prolina y azúcares solubles en las hojas bandera. El análisis de la varianza reveló diferencias significativas entre los genotipos probados, el aumento del nivel de Peroxidación lipídica es mucho mayor en las líneas avanzadas G5 y G3, en las que la peroxidación de lípidos y el daño de la membrana son mayores. Los daños oxidativos también aumentaron el contenido de prolina en las líneas G3 y G4, y azúcares solubles en la línea G5, que mostraban una alta tolerancia al estrés oxidativo inducido.

Palabras clave: daño de membrana, glifosato, especies de oxígeno reactivo, tolerancia.

Resumo

O estresse oxidativo induzido pelo glifosato é um fenômeno complexo causado por um desequilíbrio entre espécies reativas de oxigênio (ROS) e antioxidantes nas células vegetais. A presente pesquisa foi realizada no instituto de culturas de campo, Estação Experimental Agrícola de Setif (ITGC-AES), para avaliar a resposta de algum trigo duro (*Triticum Durum* Desf.) linhas expostas ao estresse oxidativo induzido pelo herbicida glifosato. Na fase de pontuação, uma solução de 5 mm de glifosato foi pulverizada sobre as folhas de bandeira, e cada medição foi tomada 48 horas após a aplicação do glyphosate. A peroxidação lipídica, a prolina livre e os açúcares solúveis foram determinados. Os resultados indicaram que o estresse oxidativo aumentou o teor de Peroxidação lipídica, prolina e açúcares solúveis nas folhas de bandeira. A análise da variância revelou diferenças significativas entre os genótipos testados, o aumento do nível de Peroxidação lipídica é muito maior nas linhas avançadas G5 e G3, nas quais a peroxidação lipídica e danos à membrana são maiores. Os danos oxidativos também aumentaram o teor de prolina nas linhas G3 e G4, e açúcares solúveis na linha G5, que estavam mostrando uma alta tolerância ao estresse oxidativo induzido.

Palavras-chave: danos à membrana, glifosato, espécies reativas de oxigênio, tolerância

Introduction

Cereal cultivation is very ancient in Algeria due to its utilization as human and animal food (Ladoui *et al.*, 2020). Among cereals, durum wheat (*Triticum durum* Desf.) is an important cereal crop in the Mediterranean basin that has been cultivated for centuries under widely varying climatic conditions (Ben M'Barek *et al.*, 2022). It is cultivated worldwide over almost 17 million ha, with a global production of 38.1 million tons in 2019 (Xynias *et al.*, 2020).

Glyphosate (N-(phosphonomethyl)-glycine) is one of the most extensively used herbicide substances in modern agriculture because of its broad spectrum of weed control (Sergiev *et al.*, 2020). It affects not only weeds but crop plants as well, leading to oxidative stress and disturbed cellular homeostasis in plants (Gomes *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020). Thus, glyphosate might stimulate the development of reactive oxygen species (ROS), resulting in oxidative stress (Spormann *et al.*, 2019). Chaki *et al.* (2020) stated that high concentrations of reactive species in plants disturb redox homeostasis, which could trigger damage to membrane lipids, proteins, and nucleic acids. Lipid peroxidation can be described generally as a process under which oxidants such as free radicals or non-radical species attack lipids containing carbon-carbon double bonds (Ayala *et al.*, 2014). The degree of lipid peroxidation is evaluated by the malondialdehyde content. It is one of the final products of lipid peroxidation and is frequently used as an indicator of oxidative stress since it reflects the degree of oxidative degradation of membranes (Sharma *et al.*, 2016; Spormann *et al.*, 2019). Similarly, Singh and Rathore (2017) noticed that the accumulation of malondialdehyde content in pea plants revealed lipid peroxidation. Plants evolved mechanisms to deal with oxidative stress caused by the accumulation of reactive oxygen species (ROS). Hence, plants accumulate certain solutes known as osmolytes to limit cellular damage and maintain the osmotic differences between the cell's surrounding membrane and the cytosol (Sharma *et al.*, 2019). Among the frequent osmolytes that play an important role in osmoregulation are proline and sugar. Proline is an amino acid that plays a beneficial role in plants exposed to stressful conditions, i.e., as a metal chelator, an antioxidative defense molecule and a signaling molecule. Furthermore, a positive correlation between the accumulation of proline and improving stress tolerance in plants has been revealed (Elewa *et al.*, 2017; Hosseinfard *et al.*, 2022). According to Rajametov *et al.* (2021), Proline protects the cell from damage caused by lipid peroxidation and detoxifies the membrane due to reactive oxygen species. In addition, several studies have reported that proline plays various roles during stressful conditions, which can improve protein stability and protect membrane integrity by binding to hydrogen bonds. Furthermore, proline may protect cells by increasing water uptake potential and facilitating the activation of enzymes Hosseinfard *et al.*, 2022). Similar, to proline, soluble sugars serve as an osmoprotectant, aid in maintaining cell homeostasis, and reactive oxygen species detoxification, and act as a signaling molecule under stressful conditions (Chauhan *et al.*, 2022). Furthermore, sugars play an active role in the regulation of photosynthesis, osmotic homeostasis, and membrane stabilization. The present research aimed to determine the oxidative stress tolerance of some durum wheat lines by assessing the degree of lipid peroxidation, proline content, and soluble sugars accumulation.

Material and methods

Plant material and growth conditions

This study was carried out during the 2021–2022 cropping season at the Agricultural Experimental Station of Setif (Algeria), (ITGC-AES, 36° 12'N and 05° 24'E and 1.081 masl), Algeria. Six advanced lines and four varieties are included in the genetic material, three of which are local varieties (table 1). All genotypes were sown in randomized complete block design with three replications, each plot consisted of six row with 2.5 m long, spaced 20 cm between rows. At the heading stage, in each plot, we sprayed four leaves from each genotype with a 5 mM glyphosate solution. All measurements were performed 48 hours after glyphosate treatments.

Table 1. The pedigrees of the durum wheat genotypes tested.

Genotype	Pedigrees
G1	RASCON_37/GREEN_2/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/...
G2	MINIMUS_6/PLATA_16/IMMER/3/SOOTY_9/RASCON_37/9/...
G3	CMH77.774/CORM//SOOTY-9/RASCON-37/3/SOMAT-4
G4	CNDO/PRIMADUR//HAI-OU-17/3/SNITAN/4/SOMAT-3/
G5	CNDO/VEE//CELTA/3/PATA_2/6/ARAM_7//CREX/ALLA/5/ENTE/...
G6	SILVER 14/MOEWE//BISU_1/PATKA_3/3/PORRON_4/YUAN_1/9/...
Jupare C 2001	STINKPOT//ALTAR-84/ALONDRA
Bousselam	Heider/Martes/Huevos de Oro. ICD-414
Boutaleb	GTA dur /Ofanto
Oued el bared	Hedba3/Ofanto

Lipid peroxidation

Oxidative damage to lipids was evaluated by quantifying the content of malondialdehyde (MDA) in leaf samples. Leaf samples (200 mg) were ground to fine powder in liquid nitrogen using a mortar and pestle and homogenized with 3 ml of a 50 mM potassium phosphate buffer (pH 7.5). An equivalent volume of 0.5 % thiobarbituric acid was added, the mixture was placed in a boiling water bath for 30 min and centrifuged at $3000 \times g$ for 10 min, and the absorbance was measured at 532 and 600 nm (Zhang *et al.*, 2013). The MDA content was calculated as described by Bao *et al.* (2009): $[MDA] \text{ (nmol.g}^{-1} \text{ FW)} = [(Abs_{532} - Abs_{600}) \times V_t / \epsilon \times FW] \times 1000$.

Proline content and soluble sugars

For the quantification of proline content (PC) in fresh leaves, the method given by Monneveux and Nemmar (1986) was used. The proline is extracted at 85 °C with methanol and stained by ninhydrin in the presence of acetic acid, orthophosphoric acid, and toluene. The measurement of the red color obtained is carried out on a spectrophotometer at 528 nm. Soluble Sugars were quantified via the anthrone reagent according to Staub (1963).

Results and discussion

Lipid peroxidation assay

Malondialdehyde (MDA) level is a product of lipid peroxidation; it's commonly used as a biomarker of oxidative stress (Morales and Munné-Bosch, 2019). The data presented in table 2 showed a significant increase in levels of MDA content after glyphosate treatments. The maximum increase in MDA was observed in line G5 ($65.8 \text{ nmol.g}^{-1} \text{ FW}$), followed by line G3 ($52.83 \text{ nmol.g}^{-1} \text{ FW}$). The significant increase in MDA content indicates a strong imbalance of the biomembrane lipid peroxidation in the herbicide-treated plants (Shopova *et al.*, 2021). However, we recorded a slight increase of MDA content in genotypes Jupare C 2001, Boutaleb, and Oued el bared with 21.09, 26.32, and $26.96 \text{ nmol.g}^{-1} \text{ FW}$ respectively, with an average of 35.24; genotypes with a lower level of lipid peroxidation are considered more tolerant to oxidative damage. Both lines G5 and G3 show a high positive deviation of MDA levels above the average (figure 1), indicating a high degradation of lipids in the cell membrane, which is an indicator of severe oxidative stress. While genotypes with a negative deviation have low oxidative damage and stable cell

membranes. Gomes *et al.* (2017) stated that oxidative stress caused by herbicides increases lipid peroxidation (MDA concentration) in plants. However, Shopova *et al.* (2021) observed that glyphosate caused typical adverse alterations in wheat growth; glyphosate-suppressed plant growth is a consequence of the accumulation of ROS, which induce degradation in cellular biomembranes as evidenced by the increased amount of MDA. It's also known that lipid peroxidation could have damaged the chloroplast by inhibiting the synthesis of chlorophyll and thus photosynthesis (Langaro *et al.*, 2020). Membrane lipid peroxidation has often been used as a tool to determine the degree of plant sensitivity to oxidative damage. Tulkova and Kabashnikova (2021) found that lipid peroxidation refers to a series of free radical reactions in unsaturated fatty acids and that an increase in lipid peroxidation activity under prolonged stress indicates a decline in the scavenging ability within plant cells. Karabulut and Canakcı (2021) analyzed the effects of the herbicide glyphosate in maize and wheat varieties and observed that plants produce antioxidant defense systems, including enzymatic and non-enzymatic methods, as a result of ROS accumulation. Thus, as the amount of ROS increases, the level of MDA begins to accumulate. Furthermore, lipid peroxidation products induce a loss of membrane integrity that ultimately leads to unadorned cytotoxicity, and could result in unrestrained cellular growth or even apoptosis. Our findings support several reports that also found an increased amount of MDA content after glyphosate treatment in barley (Spormann *et al.*, 2019), tomato (Soares *et al.*, 2019), and peas (Sergiev *et al.*, 2020). Similarly, Bouchemal *et al.* (2016) revealed that the oxidative stress mediated by paraquat herbicide increased the level of lipid peroxidation in wheat genotypes.

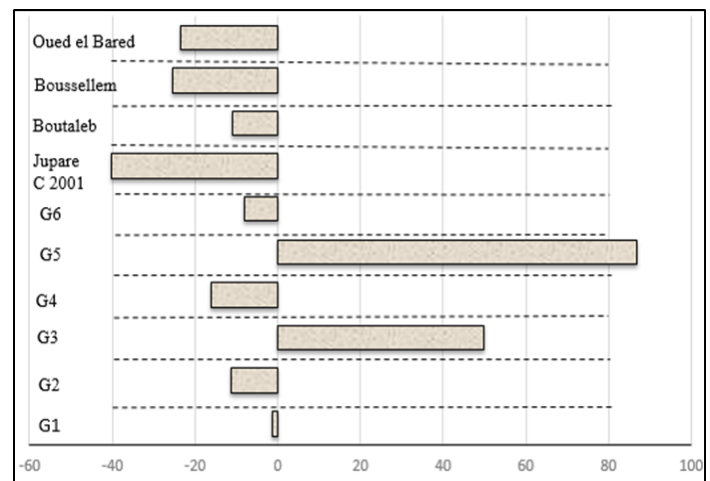


Figure 1. Deviation from the mean values of malondialdehyde under oxidative stress in genotypes tested.

Proline content and soluble sugars accumulation

Based on the results in table 2, an increase in the accumulation of free proline was observed in leaves treated with glyphosate; the highest accumulations were observed for the lines G3 ($54.17 \text{ } \mu\text{mol.g}^{-1} \text{ FW}$), and G4 ($42.81 \text{ } \mu\text{mol.g}^{-1} \text{ FW}$). While, line G6 showed the lowest value ($19 \text{ } \mu\text{mol.g}^{-1} \text{ FW}$), with an overall mean of 33.61. It is believed that this increase is due to oxidative damage induced by glyphosate. Furthermore, Sergiev *et al.* (2020) reported that oxidative damage caused by glyphosate application increased significantly the proline content in pea plants; a similar response was also observed in wheat (Shopova *et al.*, 2021). Rapid accumulation of free proline

Table 2. Change in Malondialdehyde content, proline content and soluble sugar in genotypes tested.

Genotypes	Non-glyphosate conditions			Glyphosate application		
	MDA nmol.g ⁻¹ FW	PC μmol.g ⁻¹ FW	SS ug.g ⁻¹	MDA nmol.g ⁻¹ FW	PC μmol g ⁻¹ FW	SS μg.g ⁻¹
G1	6 ^e	10.10 ^{bc}	63.24 ^{bcd}	34.77 ^{bc}	27.2 ^{bc}	100.6 ^{bc}
G2	5.74 ^e	7.81 ^{bcd}	77.86 ^{abc}	31.22 ^{bc}	25.85 ^{bc}	134.81 ^{abc}
G3	10.83 ^{bc}	14.48 ^a	66.48 ^{bc}	52.83 ^{ab}	54.17 ^a	127.3 ^{abc}
G4	8.12 ^{bc}	5.64 ^{de}	25.91 ^e	29.54 ^{bc}	42.81 ^{ab}	39.44 ^d
G5	20.9 ^a	10.65 ^{ab}	104.84 ^a	65.8 ^a	30.58 ^{bc}	178.81 ^a
G6	13.54 ^{abc}	4.07 ^e	69.94 ^{bc}	32.45 ^{bc}	19 ^c	103.59 ^{bc}
Jupare C 2001	5.29 ^e	11.28 ^{ab}	86.29 ^{ab}	21.09 ^c	39.78 ^{ab}	152.45 ^{ab}
Boussalam	11.22 ^{bc}	10.36 ^{bc}	76.54 ^{bc}	31.41 ^{bc}	35.25 ^{bc}	132.86 ^{abc}
Boutaleb	15.03 ^{ab}	6.54	39.31 ^{de}	26.32 ^c	27.79 ^{bc}	98.49 ^{bc}
Oued el bared	12.83 ^{abc}	9.07 ^{bcd}	56.51 ^{cd}	26.96 ^c	33.69 ^{bc}	79.84 ^{cd}
Mean	10.95	9	25.29	35.24	33.61	114.82
Min	5.29	4.07	25.91	21.09	19	39,44
Max	20.9	14.48	104.84	65.8	54.17	178.81
LSD	8.53	4.03	20.05	23.45	18.26	55.7
Effect genotypes	*	**	**	*	**	**

MDA: Malondialdehyde, PC: Proline content, SS: Soluble sugars, (*/**) significant differences at 0.05 and 0.01, respectively.

is a response to oxidative stress, with lines G4 and G3 showing a high positive deviation from the average, which are considered the most tolerant under oxidative stress (figure 2). Proline serves as an important molecule in oxidative stress resistance (Kishor *et al.*, 2022). Thus, it plays a role against oxidative damage due to its ability to eliminate ROS from the cell or activate an antioxidant defense mechanism (Langaro *et al.*,2020). According to Gomes *et al.* (2017), increased cellular ROS concentrations commonly stimulate proline biosynthesis. Proline can also act as a mediator of osmotic adjustment and protection of the plasma membrane as a source of carbon and nitrogen (Hemaprabha *et al.*, 2013). Many studies have supported the idea that proline plays a diverse role during oxidative stress, including improving photosynthesis and interact with several molecules of signaling, such as nitric oxide and phytohormones, to activate the stress signaling molecules (Hanif *et al.*, 2021; Rajametovet *et al.*, 2021). Like the proline content, the level of soluble sugars was also significantly affected by glyphosate treatments. Values of soluble sugars varied from 39.44 ug.g⁻¹ for line G4 to 178.04 ug.g⁻¹ for line G5, with an overall average of 114.82. The most stressed line, G5, has responded by increasing the total amount of sugars in their cells, which is an indicator of adaptation to oxidative damage (figure 3). Soluble sugars are an important osmolytes, which limit cellular damage due to oxidative stress; levels of sugar might also accumulate due to starch degradation under stress conditions (Sharma *et al.*, 2019). Our findings are in agreement with Fernández-Escalada *et al.* (2019), who showed that soluble sugars increased in Palmer amaranth treated with glyphosate. Soluble sugar aids in maintaining the cellular redox homeostasis, reactive oxygen species detoxification, and protect photosynthesis systems (Chauhan *et al.*, 2022).

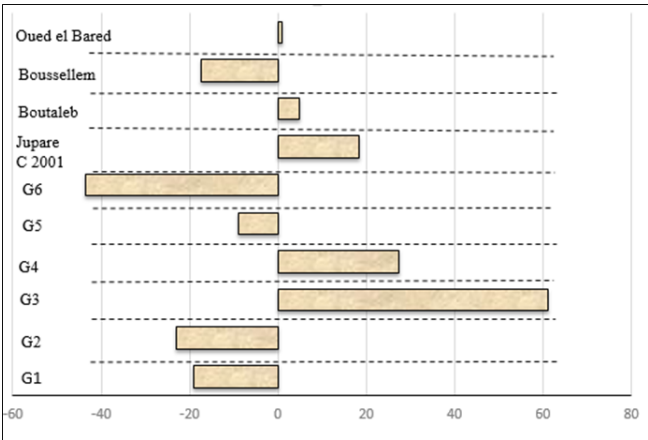


Figure 2. Deviation from the mean values of free proline under oxidative stress in genotypes tested.

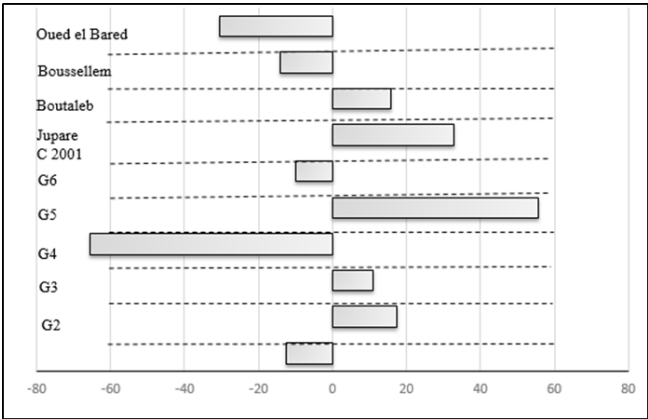


Figure 3. Deviation from the mean values of soluble sugars under oxidative stress in genotypes tested.

ROS accumulation is directly correlated with sugar accumulation to adapt to the ill effects of oxidative stress. In addition, sugar accumulation prevents the oxidation of cell membranes under water deficiency, maintains the turgidity of leaves, and prevents the dehydration of membranes and proteins (Sami *et al.*, 2016). Sensitive genotypes of crop plants adapt fewer osmoprotectants with low concentrations than tolerant genotypes under stress.

Conclusion

Oxidative stress induced by glyphosate is a complex phenomenon that negatively affects plant growth. Our findings revealed a variable response to oxidative stress in the genotypes tested. The lipid peroxidation assay revealed that both lines G3 and G5 recorded the highest MDA content, which are the susceptible lines, and genotype Jupare C 2001 is the most tolerant one. It also revealed that the genotypes tested responded to oxidative damage by accumulating proline and soluble sugars. Lines G3, G4, and G5 accumulated more proline and sugars, which suggests they are the most adapted and stable lines to oxidative stress.

Literature cited

- Ayala, A., Muñoz, M.F., and Argüelles, S. (2014). Lipid Peroxidation: Production, Metabolism, and Signaling Mechanisms of Malondialdehyde and 4-Hydroxy-2-Nonenal. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 360438. <https://doi.org/10.1155/2014/360438>.
- Bao, A.K., Wang, S.M., Wu, G.Q., Xi, J.J., Zhang, J.L., Wang, C.M. (2009). Overexpression of the Arabidopsis H⁺-PPase enhanced resistance to salt and drought stress in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Science*, 176, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.10.009>.
- Ben M'Barek, S., Laribi, M., Kouki, H., Castillo, D., Araar, C., Nefzaoui, M., Ammar, K., Saint-Pierre, C., Yahyaoui, A.H. (2022). Phenotyping Mediterranean Durum Wheat Landraces for Resistance to *Zymoseptoria tritici* in Tunisia. *Genes*, 13, 355. <https://doi.org/10.3390/genes13020355>.
- Bouchemal, K., Bouladjaj, R., Belbekri, M.N., Ykhlef, N., and Djekoun, A. (2016). Differences in antioxidant enzyme activities and oxidative markers in ten wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes in response to drought, heat and paraquat stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, (63) 5. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1235267>.
- Chaki, M., Begara-Morales, J.C., Barroso, J.B. (2020). Oxidative Stress in Plants. *Antioxidants*, 9, 481. <https://doi.org/10.3390/antiox9060481>.
- Chauhan, J., Srivastava, J.P., KumarSinghal, R., Soufan, W., KumarDadarwal, B. (2022). Alterations of Oxidative Stress Indicators, Antioxidant Enzymes, Soluble Sugars, and Amino Acids in Mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern and Coss.] in Response to Varying Sowing Time, and Field Temperature. *Frontiers in plant science*, 13: 875009. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875009>.
- Elewa, T.A., Sadak, M.S., Saad, A.M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, 14:21–33.
- Fernández-Escalada, M., González, A., Monreal, M., Royuela, M., and Zabalza, A. (2019). Physiological performance of glyphosate and imazamox mixtures on *Amaranthus palmeri* sensitive and resistant to glyphosate. *Scientific Reports*, 9, 18225. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54642-9>.
- Gomes, M.P., Le Manach, S.G., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., and Juneau, P. (2017). Glyphosate-Dependent Inhibition of Photosynthesis in Willow. *Frontiers in plant science*, 8, 207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00207>.
- Gomes, M.P., Smedbol, E., Chalifour, A., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lepage, L., Lucotte, M., and Juneau, P. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview. *Journal of Experimental Botany*, (65)17. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru269>.
- Hanif, S., Saleem, M.F., Sarwar, M., Irshad, M., Shakoor, A., Wahid, M.A., Zaman Khan, H. (2021). Biochemically triggered heat and drought stress tolerance in rice by proline application. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 305–312. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10095-3>.
- Hemaprabha, G., Swapna, S., Leena Lavanya, D., Sajitha, B., Venkataramana S. (2013). Evaluation of drought tolerance potential of elite genotypes and progenies of sugarcane (*Saccharum* sp. hybrids). *Sugar technology*, (15)1, 9-16. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0182-9>.
- Hosseini-fard, M., Stefaniak, S., Ghorbani-Javid, M., Soltani, E., Wojtyła, L., and Garnaczarska, M. (2022). Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International journal of Molecular science*, 23(9), 5186. <https://doi.org/10.3390/ijms23095186>.
- Karabulut, F., and Canakci, S. (2021). Effects of Glyphosate Herbicide on Photosynthetic Pigments and Antioxidant Enzyme Activities in Corn (*Zea mays* L.) And Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, 4(2), 61-66. <https://doi.org/10.54565/jphcfum.1004433>.
- Kavi Kishor, P.B., Suravajhala, P., Rathnagiri, P., and Sreenivasulu, N. (2022). Intriguing Role of Proline in Redox Potential Conferring High Temperature Stress Tolerance. *Frontiers Plant Science*, 13, 867531. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.867531>.
- Ladoui, K., Mefti, M., and Benkherbache, N. (2020). Selection of drought tolerant genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) through stress tolerance indices. *Agrobiologia*, 10, 1805-12. <http://agrobiologia.net/online-selection-de-genotypes-dorge-hordeum-vulgare-l-tolerants-au-stress-hydrique-par-les-indices-de-tolerance-a-la-secheresse/>.
- Langaro, A., Agostinotto, D., Ruchel, Q., Rodrigues Garcia, J., and Tessari Perboni, L. (2020). Oxidative stress caused by the use of preemergent herbicides in rice crops. *Revista Ciência Agronômica*, (48)2, 358-364. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170041>.
- Monneveux, P., Nemmar, M. (1986). Contribution to the study of drought resistance in soft wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum durum* Desf.): study of the accumulation of proline during the during the development cycle. *Agronomy*, 6 (6), 583-590. <https://doi.org/10.1051/agro:19860611>.
- Morales, M., and Munné-Bosch, S. (2019). Malondialdehyde: Facts and Artifacts. *Plant Physiology*, 180(3), 1246–1250. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00405>.
- Rajametrov, S.N., Yang, E.Y., Cho, M.C., Chae, S.Y., Jeong, H.B. (2021). Heat-tolerant hot pepper exhibits constant photosynthesis via increased transpiration rate, high proline content and fast recovery in heat stress condition. *Scientific Report*, 12; 11(1), 14328. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93697-5>.
- Sami, F., Yusuf, M., Faizan, M., Faraz, A., Hayat, S. (2016). Role of sugars under abiotic stress. *Plant Physiology et Biochemistry*, 109, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.09.005>.
- Sergiev, I., Todorova, D., Shopova, E., Brankova, L., Jankauskienė, J., Jurkonienė, S., Gavelienė, V., and Mockevičiūtė, R. (2020). Assessment of synthetic auxin type compounds as potential modulators of herbicide action in *Pisum sativum* L. *Biologia*, 75, 1845–1853. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060793>.
- Sharma, A., Shahzad, B., Kumar, V., Kohli, S.K., Sidhu, G.P.S., Shreeya Bali, A., Handa, N., Kapoor, D., Bhardwaj, R., and Zheng, B. (2019). Phytohormones Regulate Accumulation of Osmolytes Under Abiotic Stress. *Biomolecules*, 9(7), 285. <https://doi.org/10.3390/biom9070285>.
- Sharma, P., Jha, A.B., Dubey, R.S. (2016). Oxidative stress and antioxidative defense systems in plants growing under abiotic stresses. *Handbook of Plant and Crop Stress*, p 109–158. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>.
- Shopova, E., Brankova, L., Katerova, Z., Dimitrova, L., Todorova, D., Sergiev, I., and Talaat, N.B. (2021). Salicylic Acid Pretreatment Modulates Wheat Responses to Glyphosate. *Crops*, 1(2), 88–96. <https://doi.org/10.3390/crops1020009>.
- Singh, R., Rathore, D. (2017). Oxidative stress defence responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) and chilli (*Capsicum annum* L.) cultivars grown under textile effluent fertilization. *Plant Physiology and Biochemistry*, 123, 342-358. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.027>.
- Soares, C., Pereira, R., Spormann, S., Fidalgo, F. (2019). Is soil contamination by a glyphosate commercial formulation truly harmless to non-target plants-Evaluation of oxidative damage and antioxidant responses in tomato. *Environnemental Pollution*, 247, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.063>.
- Spormann, S., Soares, C., Fidalgo, F. (2019). Salicylic acid alleviates glyphosate-induced oxidative stress in *Hordeum vulgare* L. *Journal of Environmental Management*, 241, 226–23. <https://doi.org/10.3390/crops1020009>.
- Staub, A.M. (1963). Extraction, identification and assays of carbohydrates in organ extracts and bacterial bodies. In: *Laboratory techniques*, volumes 1 and 2, Masson, Paris, 1307-1366.
- Tulkova, E., Kabashnikova, L. (2021). Malondialdehyde content in the leaves of smallleaved linden *tiliacordata* and Norway maple *acer platanoides* under the influence of volatile organic compounds. *Plant Biosystems*, 156(2), 619-627. <https://doi.org/10.1080/11263504.2021.1897701>.
- Xynias, I., Mylonas, I., Korpetis, G., Ninou, E., Tsalballa, A., Avdikos, I., and Mavromatis, G. (2020). Durum Wheat Breeding in the Mediterranean Region: Current Status and Future Prospects. *Agronomy*, 10, 432. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030432>.
- Zhang, L., Chen, L., Zhang, H., Ren, Z., and Luo, P. (2013). Effects of paraquat-induced oxidative stress on antioxidants and chlorophyll fluorescence in Stay-green wheat (*Triticum aestivum* L.) Flag leaves. *Bangladesh Journal of Botany*, 42(2), 239-245. <https://doi.org/10.3329/bjb.v42i2.18025>.
- Zhao, L., Xie, L., Huang, J., Su, Y., and Zhang, C. (2020). Proper Glyphosate Application at Post-anthesis Lowers Grain Moisture Content at Harvest and Reallocates Non-structural Carbohydrates in Maize. *Frontiers in plant sciences*, 11: 580883. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.580883>.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل مدى فعالية المؤشرات الفيزيولوجية والزراعية لانتخاب التراكيب الوراثية المتكيفة مع البيئات الشبه الجافة، من ناحية أخرى، فإننا نستكشف مدى تأثير الإجهاد التأكسدي المحفز باستعمال مبيد الأعشاب الغليفوسات على أنماط جينية مختلفة من القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) لفهم الآليات التأقلم والتكيف بشكل جيد وتحديد الأنماط الجينية الأكثر تكيفاً مع هذه الظروف الصعبة. تم تقييم مجموعة من عشرة تراكيب وراثية من القمح الصلب خلال موسمين زراعيين 2021-2022 و 2022-2023. تمت الدراسة على مستوى الحقول التجريبية التابعة للمعهد التقني للزراعات الواسعة بولاية سطيف. أظهرت نتائج تقييم الاستجابات الزراعية والفيزيولوجية للتراكيب الوراثية المختبرة على مدى موسمين أن تأثير النمط الوراثي كان معنوياً في غالبية المؤشرات المدروسة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ وجود تفاعل كبير بين التراكيب الوراثية والموسم الزراعي. تشير هذه النتائج إلى أن الاختلافات المناخية بين الموسمين الزراعيين لها تأثير كبير على المردود الحي ومركباته، كما يؤثر على العديد من الوظائف الفيزيولوجية المختلفة. أثبت الموسم 2021-2022 أنه الأكثر ملائمة للتعبير عن أغلبية المؤشرات المدروسة. أظهرت الأنماط الجينية G3 (35.23 ق/هـ)، G2 (34.86 ق/هـ) و G5 (28.9 ق/هـ) أعلى مردود حيوي؛ إضافة إلى ذلك، حافظت هذه الأنماط الوراثية على أعلى مستويات من المحتوى المائي (81.09%، 84.95% و 84.34% على التوالي) وأقل درجات حرارة للأوراق تحت هذه الظروف. يحفز مبيد الأعشاب الغليفوسات الإجهاد التأكسدي والذي يمكن أن يؤدي إلى تلف الخلايا وبالتالي تحفيز النظام الدفاعي الذي يؤدي إلى تراكم العديد من الجزيئات الدفاعية. تشير نتائجنا إلى أن الأنماط الجينية G1 و G3 حساسة بشكل خاص لهذا الإجهاد التأكسدي، حيث تتراكم فيها مستويات عالية من المالونديالدهيد. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ انخفاض كبير في محتوى الكلوروفيل في الصنف المحلي بوطالب مقارنة بباقي التراكيب الوراثية. أظهرت السلالات G5، G3، G4، Jupare C 2001، واد البارد وبوسلام قدرة كبيرة على تجميع البرولين والسكريات القابلة للذوبان مما يمنحها قدرة أفضل على تحمل الإجهاد التأكسدي. تعتبر مؤشرات الاستقرار في الانتاجية البارامترية وغير البارامترية مناسبة لانتخاب أنماط جينية مستقرة ومتكيفة للظروف الشبه الجافة. بالإضافة إلى ذلك أثبتت نتائج تحليل الاستقرار أن السلالات G1 و G6 و بوسلام تتميز بمردود حيوي أكثر ثباتاً في حين السلالتين G3 و واد البارد تميزت بثبات وزن الألف حبة.

الكلمات المفتاحية: *Triticum durum* Desf، الشبه الجافة، فيزيولوجية، زراعية، الإجهاد التأكسدي.

Résumé

La présente étude vise à analyser l'efficacité des critères physiologiques et agronomiques pour la sélection des génotypes adaptés aux environnements semi-arides. D'autre part, nous explorons l'impact du stress oxydatif induit par l'herbicide glyphosate sur les génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) pour mieux comprendre les mécanismes de tolérance et d'identifier des génotypes plus adaptés à ces conditions difficiles. Une collection de dix génotypes de blé dur (*triticum durum* Desf.) a été évaluée pendant deux saisons de culture, 2021-2022 et 2022-2023, dans les champs expérimentaux de l'Institut Technique des Grandes Cultures, Sétif. Les résultats de l'évaluation des réponses agro-physiologiques des génotypes de blé sur deux saisons montrent que l'effet du génotype était significatif pour la majorité des paramètres étudiés. De plus, une interaction significative entre le génotype et l'année a été observée. Cela suggère que la variabilité climatique entre les deux années a un impact significatif sur le rendement en grain et ses composantes, influençant également divers processus physiologiques. La saison 2021-2022 s'est avérée la plus favorable pour l'expression de la plupart des paramètres. Les génotypes G3 (35,23 q ha⁻¹), G2 (34,86 q ha⁻¹) et G5 (28,9 q ha⁻¹) ont affiché les rendements les plus élevés. De plus, ils ont maintenu les niveaux de teneur en eau les plus élevés (81,09 %, 84,95 % et 84,34 % respectivement) et les températures foliaires les plus basses dans ces conditions. L'herbicide glyphosate induit un stress oxydatif, pouvant entraîner des altérations cellulaires et déclencher ainsi le système de défense qui accumule divers osmolytes protecteurs. Nos résultats indiquent que les génotypes G1 et G3 sont particulièrement sensibles à ce stress oxydatif, accumulant des teneurs élevées en malondialdéhyde. De plus, une forte diminution de la teneur en chlorophylle a été observée chez la variété locale Boutaleb. Les génotypes G5, G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared et Boussem ont montré une grande capacité à accumuler la proline et les sucres solubles, leur conférant ainsi une meilleure tolérance au stress oxydatif. Les indices paramétriques et non paramétriques sont appropriés pour la sélection des génotypes stables et adaptés dans les régions semi-arides. De plus, les génotypes G1, G6 et Boussem se distinguent par un rendement en grains plus stable ainsi que les génotypes G3 et Oued el bared affichent une stabilité pour le poids de mille grains.

Mot clés : *triticum durum* Desf., semi ride, physiologique, agronomique, stress oxydatif.

Abstract

The present study aims to analyze the efficiency of physiological and agronomic criteria for selecting genotypes adapted to semi-arid environments. On the other hand, we are exploring the impact of oxidative stress induced by the herbicide glyphosate on durum wheat (*triticum durum* Desf.) genotypes to understand the mechanisms of tolerance better and to identify genotypes more adapted to these difficult conditions. A collection of ten durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) was evaluated during two growing seasons, 2021-2022 and 2022-2023, in the experimental fields of the Technical Institute of Field Crops, Sétif. The results of the evaluation of the agro-physiological responses of wheat genotypes over two seasons show that the effect of the genotype was significant for the majority of the parameters studied. Additionally, a significant interaction between genotype and year was observed. This suggests that climatic variability between the two years has a significant impact on grain yield and its components, also influencing various physiological processes. The 2021-2022 season proved to be the most favorable for the expression of most parameters. Genotypes G3 (35.23 q ha⁻¹), G2 (34.86 q ha⁻¹) and G5 (28.9 q ha⁻¹) showed the highest yields. Additionally, they maintained the highest water content levels (81.09%, 84.95%, and 84.34% respectively) and lowest leaf temperatures under these conditions. The herbicide glyphosate induces oxidative stress, which can lead to cellular damage and thus trigger the defense system which accumulates various protective osmolytes. Our results indicate that the G1 and G3 genotypes are particularly sensitive to this oxidative stress, accumulating high levels of malondialdehyde. In addition, a strong decrease in chlorophyll content was observed in the local variety Boutaleb. The G5, G3, G4, Jupare C 2001, Oued el Bared, and Boussem genotypes showed a great capacity to accumulate proline and soluble sugars, thus giving them better tolerance to oxidative stress. Parametric and non-parametric indices are suitable for the selection of stable and adapted genotypes in semi-arid regions. In addition, the G1, G6, and Boussem genotypes are distinguished by a more stable grain yield as well and the G3 and Oued el bared genotypes display stability for the weight of a thousand grains.,

Keywords: *triticum durum* Desf, semi-arid, physiological, agronomic, oxidative-stress.

